



universität
wien

DIPLOMARBEIT / DIPLOMA THESIS

Titel der Diplomarbeit / Title of the Diploma Thesis

„Evaluation eines Systems zur Echtzeitoptimierung der
Wettkampfzielzeit“

verfasst von / submitted by

Georg Alexander Dorn

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Magister der Naturwissenschaften (Mag.rer.nat.)

Wien, 2017 / Vienna, 2017

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 190 482 884

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Lehramtsstudium UF Bewegung und Sport,
UF Informatik und Informatikmanagement

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Arnold Baca

Mitbetreut von / Co-Supervisor:

Dipl.-Ing. Martin Dobiasch MSc

Zusammenfassung

Durch die Entwicklung moderner Laufsensoren und Übertragungsprotokolle ist es heute möglich, verschiedenste Sensoren mit einem Smartphone zu verbinden und damit erfasste Messdaten in Echtzeit über das Internet zu versenden. Dieses Konzept macht sich der von der Universität Wien entwickelte Mobile Motion Advisor zu Nutze, um Live-Daten von Läuferinnen und Läufern via Smartphone-Applikation auf einen Server zu transferieren. Mit Hilfe des Feedback-Moduls PerPot können die Daten in Echtzeit ausgewertet werden und ein Feedback zur Anpassung der Geschwindigkeit wird an die Athletinnen bzw. die Athleten übermittelt. In bisherigen Studien wurde die für das System notwendige Kalibrierung auf dem Laufband bzw. mit Hilfe eines Tempomachers durchgeführt und die Reihenfolge der Vergleichsläufe nicht berücksichtigt. In dieser Studie wurde das System mit 26 Probandinnen und Probanden erstmals vollständig unter realen Bedingungen getestet. Dabei absolvierten die Probandinnen und Probanden einen Kalibrierungslauf zur Messung ihrer Leistungsdaten, um anschließend zwei 10-km-Läufe zu absolvieren. In randomisierter Reihenfolge wurde ein Lauf mit Coaching durch das System und ein Vergleichslauf ohne Coaching absolviert. Die Studie zeigte, dass die Reihenfolge der Läufe einen Einfluss auf das Ergebnis hat und die PerPot-Läufe im Durchschnitt 1 Min 7 Sekunden bzw. 5.7% schneller waren als die Läufe ohne Coaching. Der Unterschied ist mit $p=0.191$ nicht signifikant. Für den Fall, dass der PerPot-Lauf als zweiter Lauf durchgeführt wurde, konnte ein signifikanter Unterschied $p=0.009$ nachgewiesen werden, während die Läufe in umgekehrter Reihenfolge keinen signifikanten Unterschied zeigten.

Schlagwörter: Mobile Coaching – Mobile Motion Advisor – PerPot – Echtzeit-Feedback

Abstract

Through the development of advanced running sensors and transmission protocols it is now possible to connect a variety of sensors with a Smartphone and transmit gathered data in real-time via the internet. This concept is used by the Mobile Motion Advisor, developed by the University of Vienna, to gather and send live data of runners to a server via Smartphone application. Combined with the feedback module PerPot, data can be evaluated in real-time and feedback for the adjustment of speed will be transmitted to the runners. In previous studies the necessary calibration of the system was done on the treadmill or with the support of a pacemaker and the order of the test runs was overlooked. In this study, for the first time the system was tested with 26 subjects entirely under real conditions. The subjects completed a calibration run to determine their performance data. Afterwards they completed two 10-km-runs. In randomized order, one run was coached by the system and one run was done without coaching, for comparison. The study showed that the order of the runs have an impact on the result. The PerPot runs were on average 1 minute and 7 seconds or 5.7% faster than the compared runs without coaching. The p-value of this difference is 0.191 and is not significant. In case that the PerPot runs were completed second, significant difference with a p-value of 0.009 was evaluated, while the runs in the reverse order showed no significant difference.

Key words: Mobile Coaching – Mobile Motion Advisor – PerPot – Real-time-Feedback

Vorwort

Ich möchte mich bei dem Betreuer meiner Diplomarbeit, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Arnold Baca, herzlich bedanken, der das Vertrauen in mich gesetzt hat, dieses komplexe Forschungsthema zu bewältigen. Mein weiterer großer Dank gilt Dipl.-Ing. Martin Dobiasch MSc, der im Auftrag von Herrn Dr. Baca die direkte Betreuung übernommen hat. Er unterstützte mich von Anfang an bei der Planung, insbesondere während der Entwicklung und Durchführung der Studie konnte ich mich jederzeit an ihn wenden. Ohne seine technische Betreuung und seinen Rat wäre eine erfolgreiche Durchführung der Studie unmöglich gewesen. Mein weiterer Dank gilt natürlich den Probandinnen und Probanden für die Teilnahme an der Studie. Für einige waren die gestellten Anforderungen hoch und sie mussten sich selbst überwinden, um die Studie erfolgreich abzuschließen. Durch ihre Einsatzwilligkeit sowie ihr Feedback während der Studie, konnte das System stetig weiterentwickelt und optimiert werden.

Schlussendlich gilt mein besonderer Dank noch meiner Mutter, die mich in allen Lebenslagen unterstützt und als Ratgeber und Motivator zur Seite steht. Aufgrund ihres Einsatzes ermöglichte sie mir, dass ich diese Diplomarbeit während meiner beruflichen Tätigkeit überhaupt abschließen konnte.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
Abstract.....	4
Vorwort.....	6
1 Einleitung	10
2 Theoretische Grundlagen	12
2.1 Leistungsdiagnostik im Ausdauersport.....	12
2.1.1 Energiebereitstellungsprozesse.....	13
2.1.2 Laktattest und individuelle anaerobe Schwelle	14
2.1.3 MaxLass-Test	17
2.1.4 Nutzung der iANS zur Trainingssteuerung	18
2.1.5 Belastungsreaktion im Ausdauersport	19
2.1.6 Erholung im Ausdauersport.....	23
2.1.7 Einfluss der Umgebungsfaktoren auf die Herzfrequenz im Ausdauersport ..	25
2.2 Performance Potential Modell (PerPot)	28
2.2.1 Basis-Metamodell.....	29
2.2.2 Delay of Atrophy	33
2.2.3 Kalibrierung.....	34
2.2.4 PerPot-Stufentest	35
2.2.5 Simulation der iANS mit PerPot	38
2.2.6 Simulation der Wettkampf-Zielzeit	39
3 Mobile Coaching	41
3.1 Mobile Coaching Protokoll.....	46
3.2 Technische Anpassung PerPot und MMA	48
3.3 Anpassung des Modells an den Laufsport	48
3.3.1 Herzfrequenzmesser	48
3.3.2 Footpod.....	49

4	Studie.....	50
4.1	Untersuchungsdesign	50
4.2	Probandinnen und Probanden	51
4.3	Durchführung Kalibrierungslauf.....	52
4.4	10-km-Läufe	55
4.4.1	Freier Lauf	56
4.4.2	PerPot-Lauf.....	56
4.5	Auswertung.....	57
4.5.1	Laufzeiten	57
4.5.2	Vergleich unter Berücksichtigung der Reihenfolge der Läufe	60
4.5.3	Abweichung Perpot-Vorhersage.....	62
4.5.4	Zuverlässigkeit der Zielzeit-Prognosen verglichen mit der Endzeit	65
4.6	Diskussion der Daten	68
4.6.1	Objektivität der Daten und äußere Einflüsse	68
4.6.2	Technische Einflussfaktoren	69
4.7	Fazit	71
5	Zusammenfassung und Ausblick	73
6	Literaturverzeichnis.....	75
7	Abbildungsverzeichnis	77
8	Tabellenverzeichnis.....	78
9	Anhang.....	79

1 Einleitung

Im Sport erhält die digitale Datenerfassung und Auswertung eine immer größere Bedeutung. Durch die fortschreitende technische Entwicklung ist es heute möglich, eine Vielzahl an Daten zu erfassen, zu analysieren und daraus präzise Trainingsvorgaben abzuleiten. So setzen bereits viele Profi-Teams in Mannschaftsportarten auf diese neuen Techniken. Über Sensoren, die in den Sportgeräten oder in der Kleidung der Spielerinnen und Spieler verbaut sind, werden Daten darüber gesammelt, wie sich Athletinnen und Athleten oder das Sportgerät zu jeder Zeit verhalten. Im Fußball ist es in Profi-Vereinen bereits üblich, die Schuhe der Spielerinnen und Spieler sowie den Spielball mit Sensoren auszustatten, um eine große Summe an Informationen zu sammeln, aus denen dann trainings- und wett-kampfrelevante Schlüsse gezogen werden können. Nicht nur die Vereine nutzen diese Daten, so werden z.B. bei Fußball-Liveübertragungen am Ende eines Spiels oft Statistiken wie die gelaufene Distanz der Teams oder einzelner Spieler verglichen.

Auch in Einzelsportarten, wie dem Laufsport kann diese Technik zur Leistungsoptimierung genutzt werden. Über Sensoren wird bei einer Läuferin oder einem Läufer die Schrittfrequenz, die Herzfrequenz und die Geschwindigkeit gemessen. Es gibt mittlerweile einige Softwarelösungen für Smartphones, die diese Daten speichern und für die Trainingsanalyse aufbereiten. Echtzeitleösungen, d.h. Softwarelösungen, die während der sportlichen Tätigkeit Feedback oder Trainingsanpassungen durchführen, sind jedoch nicht oder nur mit eingeschränkter Funktionalität vorhanden. Durch eine Kooperation der Universitäten Mainz und Wien wurde ein Mobile Coaching System entwickelt, das Daten erfasst, auf einen Server übermittelt und Trainerinnen bzw. Trainern die Möglichkeit bietet, das Training zu überwachen und anzupassen.

Mit der an der Universität Wien von Baca et al. (2010) entwickelten Software Mobile Motion Advisor (MMA) können über das Protokoll Ant+ verschiedene Parameter (z.B. Geschwindigkeit, Herzfrequenz, Schrittlänge) erfasst und diese Daten auf einen Server transferiert werden. Diese für Smartphones entwickelte und auf den Laufsport optimierte Applikation wurde mit dem in Mainz entwickelten Performance Potential Modell (PerPot) kombiniert. Im Zusammenwirken können so während eines Trainings oder Wettkampfes Daten erhoben und in Echtzeit automatisch ausgewertet werden, um der Läuferin bzw. dem Läufer ständiges Feedback über eine für sie optimale Laufgeschwindigkeit zu geben. Dadurch soll ein optimaler Geschwindigkeitsverlauf mit dem Ziel der schnellstmöglichen Endzeit erreicht, sowie ein vorzeitiger Einbruch verhindert werden.

Bisher wurde das System in Einzeluntersuchungen im Bereich Laufsport verwendet und optimiert und soll nun im Rahmen einer größeren Untersuchung verschiedene Fragestellungen beantworten:

1. Kann mit dem System eine bessere Leistung erzielt werden?
2. Wie zuverlässig sind die prognostizierten Zielzeiten, die das System liefert, verglichen mit der am Ende gelaufenen Zeit?

Zum besseren Verständnis dieser Forschungsfragen werden in Kapitel zwei die Grundlagen der Leistungsdiagnostik behandelt. Über die verschiedenen Energiebereitstellungsprozesse die während des Laufens aktiv sind, lassen sich die Bereiche des aeroben und anaeroben Stoffwechsels definieren und Testverfahren wie der Laktatstufentest und der Max-Lass-Test ableiten. Anschließend werden die Anwendungsmöglichkeiten zur Trainingssteuerung der durch die Testverfahren ermittelten individuellen anaeroben Schwelle (iANS) erläutert. Die Bedeutung der Regeneration und der Umgebungsfaktoren für die Leistungsfähigkeit werden ebenfalls beschrieben. Diese Einflussfaktoren müssen insbesondere bei der Wahl des Studiendesigns berücksichtigt werden. Im abschließenden Teil dieses Kapitels wurden das PerPot-Metamodell vorgestellt und die Anwendungsmöglichkeiten im Laufsport erläutert. Die Kalibrierungsfaktoren und die Anpassungen des Stufentests, mit dem die Leistungsfähigkeit von Athletinnen und Athleten gemessen werden kann, bilden die Überleitung zum nächsten Kapitel.

Im dritten Kapitel wird das Prinzip des Mobile Coaching näher betrachtet und die Funktionsweise des MMA erklärt. Es werden die notwendigen technischen Anpassungen an den Laufsport beschrieben, mit dem das System durch das Zusammenwirken von MMA und PerPot genutzt werden kann, um die Leistungsfähigkeit von Läufern zu verbessern. Am Ende des Kapitels wird die für die Durchführung der Studie notwendige Ausrüstung und ihre Funktionsweise erklärt.

Die Studie und gleichzeitig der Hauptteil dieses Forschungsthemas wird in Kapitel vier präsentiert. In Bezugnahme der zuvor erwähnten Theorie wird erläutert, welche Anpassungen noch durchzuführen waren und unter welchen Rahmenbedingungen die Studie durchgeführt wurde. In der anschließenden Auswertung mittels SPSS und Excel werden die Studienergebnisse präsentiert, verschiedenen Fragestellungen der Studie beantwortet und unter kritischer Betrachtungsweise interpretiert. Als Schlusspunkt dieser Arbeit wird ein Ausblick über die weiteren Anwendungs- und Validierungsmöglichkeiten des Systems gegeben.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Leistungsdiagnostik im Ausdauersport

Die Leistungsdiagnostik umfasst eine Vielzahl an Methoden, um die Leistungsfähigkeit von Athletinnen und Athleten in verschiedensten Sportarten zu messen, oder auch verschiedene Eigenschaften, wie die koordinativen Fähigkeiten zu testen. Röthig (1992, S. 277, zit. nach Weineck, 2004, S. 51) beschreibt die Hauptaufgabe der Leistungsdiagnostik als „das Erkennen und Benennen des individuellen Niveaus der Komponenten einer sportlichen Leistung oder eines sportlichen Leistungszustandes“.

Eine zielgerichtete Leistungsdiagnostik stellt also eines der Mittel dar, mit dem die Entwicklung des Leistungspotentials einer Athletin bzw. eines Athleten gemessen und dokumentiert werden kann. Sie dient aber auch als Grundlage zur optimierten Trainingssteuerung und ist im Spitzensport fest verankert. Die Planung einzelner Trainingseinheiten kann basierend auf verschiedenen Leistungstests ebenso abgeleitet werden, wie die Abstimmung zwischen Trainingsplanung und Wettkampf. Durch modernste Sensoren können immer mehr Trainingsdaten gesammelt und zur Datenanalyse verwendet werden. Im Ausdauersport orientiert man sich dabei hauptsächlich an der Herzfrequenz und der Geschwindigkeit. Mittels verschiedener Leistungstests (z.B. Conconi-Test, Laktat-Test, MaxLass-Test) kann die Ausdauerfähigkeit einer Athletin bzw. eines Athleten beurteilt und interpretiert werden. Diese Tests müssen bestimmte Gütekriterien erfüllen, insbesondere hinsichtlich der Zuverlässigkeit und Gültigkeit. Im Laufsport hat sich der Laktat-Test als Standard zur Ermittlung der individuellen anaeroben Schwelle (iANS) durchgesetzt. Der Laktat-Test ist ein Stufentest, bei dem das Tempo kontinuierlich gesteigert wird und den Athletinnen und Athleten in bestimmten Abständen zur Ermittlung des aktuellen Laktatpegels Blut abgenommen wird. Zugrunde liegt dieser Methode, dass sich bestimmte Energiebereitstellungsprozesse im menschlichen Körper mit der Erhöhung der Intensität der Belastung anpassen und mehr Laktat produziert wird. Der Laktatpegel im Blut wird daraufhin genutzt, um die Leistungsfähigkeit einer Athletin oder eines Athleten zu messen. In Abhängigkeit von der iANS, die eine Grenze zum Erhalt des stabilen Leistungsniveaus kennzeichnet, wurden von verschiedenen Autorinnen und Autoren Trainingsbereiche festgelegt, die genutzt werden können, um trainingspezifische Zielsetzungen zu erreichen. Im Folgenden werden die der Leistungsdiagnostik zugrunde liegenden physiologischen Prozesse und die Möglichkeiten zur Trainingssteuerung erläutert.

2.1.1 Energiebereitstellungsprozesse

Adenosintriphosphat (ATP) stellt den Brennstoff unserer Zellen dar. Der Stoff sorgt dafür, dass sich Muskeln anspannen und entspannen können. Während der Muskelarbeit wird der Stoff in Adenosindiphosphat (ADP) umgewandelt, wodurch Energie freigesetzt wird und mechanische, osmotische und chemische Arbeit verrichtet werden kann. Die Menge an ATP ist jedoch nicht unbegrenzt im Muskel vorhanden und muss bei Belastung über verschiedene Energiebereitstellungsprozesse nachgeliefert werden. (vgl. Janssen, 2003, S. 14)

Nach Schurr (2003, S. 10-11) bedient sich der menschliche Körper 3 verschiedener Prozesse zur Energiefreisetzung:

- aerob
- anaerob
- anaerob alaktazid

Anaerob alaktazide Belastungen umfassen den Verbrauch von in Muskel eingelagertem ATP, das nach Schurr (2003) während Belastung in ca. 2-3 Sekunden verbraucht ist. Im nächsten Schritt wird über das Kreatinphosphatsystem mit eingelagertem Kreatinphosphat (KP) aus dem zuvor bei Muskelkontraktion entstandenem ADP wieder ATP erzeugt. Janssen (2003) erklärt, dass das ganze Phosphat-System ca. 10 Sekunden zur Verfügung steht und KP nach ca. 6-8 Sekunden verbraucht ist. Das Phosphatsystem benötigt keinen Sauerstoff und es kommt daher zu keiner Milchsäureproduktion. Nach Ende der Belastung dauert es 3 Minuten bis ca. 70% der Phosphate ATP und KP wieder hergestellt sind. Nach 3-5 Minuten sind diese Reserven fast vollständig wieder hergestellt. Janssen (2003, S. 15) erklärt weiter, dass durch ein 8 monatiges Ausdauertraining die Phosphatspeicher um bis zu 50% vergrößert werden können und durch ein 8-wöchiges Sprinttraining die Anzahl der Enzyme zum Abbau und Wiederaufbau des KP vermehrt werden kann. Ein weiterer anaerob alaktazider Energiebereitstellungsprozess ist die Lypolyse. Aufgrund ihrer deutlich niedrigeren Energiebereitstellungsrate wird dieser Prozess jedoch oft separat dargestellt.

Von anaerob laktazidem Bereich spricht man, wenn der aerobe Stoffwechsel nicht mehr ausreichend Energie liefern kann und dadurch das Gleichgewicht von Laktat-Aufbau und Abbau nicht mehr gewährleistet ist. Dabei wird Glukose durch den Prozess der Glykolyse im Muskel unvollständig abgebaut. Das frei werdende ADP kann zur Resynthese von ATP genutzt werden. Dabei entsteht das Zwischenprodukt Pyruvat (Schurr, 2003, S. 17), das ohne Oxidation durch Sauerstoff zu Laktat umgewandelt wird. Je nach Intensität und Be-

leistungsdauer kann das Laktatgleichgewicht zwischen 2 und 7 mmol/l liegen. Durch einen stetigen Anstieg des Laktats tritt die Azidose, die Übersäuerung ein. Ein Leistungseinbruch ist die unmittelbare Folge. (vgl. Schurr, 2003, S. 11)

Janssen (2003, S. 17), beschreibt diesen Umwandlungsprozess mit der folgenden Formel:

„ $\text{ADP} + \text{Glukose} \Rightarrow \text{ATP} + \text{Milchsäure}$ “

Im **aeroben Stoffwechsel** wird über die Glykolyse ebenfalls ATP mittels Abbau von Glukose hergestellt. Jedoch wird das Zwischenprodukt Pyruvat nicht zu Milchsäure umgewandelt, sondern durch Oxidation und die Hinzunahme freier Fettsäuren weiterverwertet. Bei diesem Prozess entstehen ebenfalls ATP bzw. Kohlendioxid und Wasser als Restprodukte. (vgl. Janssen, 2003, S. 16)

Janssen (2003, S. 16) fasst diesen Prozess zusammen:

„ $\text{ADP} + \text{Glukose} \Rightarrow \text{ATP} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ “

Die Energiebereitstellung ist jedoch deutlich langsamer wie bei der Phosphat-Nutzung. Die Glukose-Speicher reichen meist für eine Belastung von 60-90 Minuten und können durch Training vergrößert und durch Kohlenhydrat-Restriktion und anschließender Ladephase kurzfristig weiter vergrößert werden. (vgl. Janssen, 2003, S. 16)

Parallel dazu findet die Lypolyse statt, bei der Fett zu Fettsäuren gespalten und mittels Oxidation zur ATP Gewinnung genutzt werden kann. Die Nebenprodukte sind ebenfalls Kohlendioxid und Wasser. Grundsätzlich laufen alle Energiebereitstellungsprozesse gleichzeitig ab. Die Lypolyse ist jedoch die langsamste Form und mit steigender Belastung verschiebt sich das Verhältnis der Energiebereitstellungsrate in Richtung der Glykolyse. Außerdem brauchen die aeroben Prozesse zumindest 2-3 Minuten, bis Herz, Lunge und Blutzirkulation voll funktionstüchtig sind. (vgl. Janssen, 2003, S. 16)

2.1.2 Laktattest und individuelle anaerobe Schwelle

Zur Trainingssteuerung im Laufsport hat sich die Laktatdiagnostik mittels Laktattest durchgesetzt. Durch die Ermittlung der iANS lassen sich die Trainingsprozesse sehr effizient optimieren. Der Laktattest ist ein Stufentest, durchgeführt auf einem Laufband oder Radergometer, bei dem alle 3-4 Minuten die Intensität erhöht wird und zwischen den Erhöhungen Blut über das Ohr zur Laktatmessung abgenommen wird. Dabei kann die Startgeschwindigkeit, die Dauer der Stufen und die Erhöhung der Belastung je nach Modell etwas variieren. Ein Abbruch des Tests erfolgt in der Regel, wenn der Kurvenverlauf aus-

reichend dokumentiert ist und insbesondere ein rapider Anstieg des Laktatspiegels ausgelöst wurde. Abbildung 1 zeigt den typischen Verlauf einer Laktatkurve und die Bestimmung der iANS nach Mader.

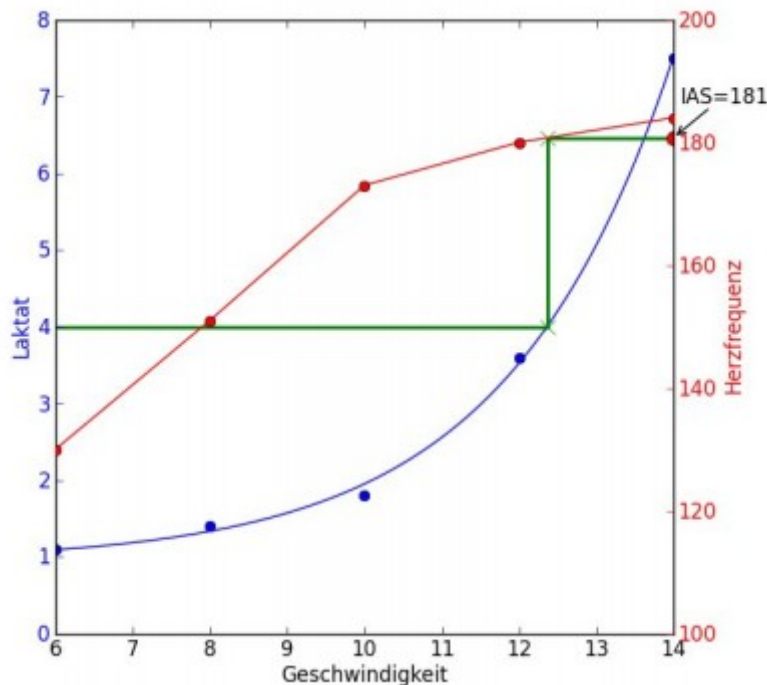


Abb. 1: Mader-Modell zur Ermittlung der anaeroben Schwelle (Endler, 2013, S. 28)

Der aerob-anaerobe Bereich beschreibt den Herzfrequenz-Bereich, in dem sich Laktat-Aufbau und Abbau die Waage halten. Schurr (2003) verwendet hierfür den Begriff „Laktat-Steady-State“. Die anaerobe Schwelle ist dabei der Wert, bei dem gerade noch ein Gleichgewicht zwischen Laktat Auf- und Abbau gehalten wird. Aus zahlreichen Untersuchungen haben sich die Werte 2 und 4 mmol/l für die anaerobe und aerobe Schwelle herausgebildet. (vgl. Schurr, 2003, S. 14) Die durch einen Laktattest ermittelte iANS eignet sich gut zur Trainingssteuerung. Sie ist jedoch kein exakt gemessener Wert, sondern wird wie in Abb. 1 dargestellt, näherungsweise bestimmt. Endler (2013, S. 26) betont hier, „dass zur exakten Bestimmung des Steady-State keines der Laktatschwellenmodelle verwendet werden kann, da diese auf Basis eines stufenförmig ansteigenden Belastungsniveaus den Punkt approximativ versuchen zu berechnen.“ Somit ergeben sich durch den stufenförmigen Ablauf je nach Berechnungsmethode geringfügige Abweichungen.

Der Begriff der iANS impliziert, dass die Laktatgrenzen vom individuellen Trainingsniveau abhängen und die iANS daher auch bei einem niedrigeren oder höherem Laktat-Level erreicht werden kann. Nach Zintl & Eisenhut (2004) befindet sich die iANS auf einer Lak-

tatkurve genau an jenem Punkt, an dem die kritische Steigung beginnt. Die Festlegung auf Laktatschwellen und die Methode zur Ermittlung der iANS unterscheidet sich jedoch stark nach Modell und Autorin bzw. Autor. Endler (2013, S. 28-31) gibt in seiner Dissertation einen Überblick über die Herangehensweisen verschiedener Autorinnen und Autoren bei der Ermittlung der iANS.

Von der Beschreibung der iANS lässt sich ableiten, warum diesem Wert in der Trainingssteuerung eine so hohe Relevanz beigemessen wird. Die Herzfrequenz, bei der gerade noch der maximale Steady-State gehalten werden kann, ist genau jener Punkt, an dem auch länger andauernde Belastungen ohne Einbruch absolviert werden können (vgl. Endler, 2013, S. 26). Die iANS bildet außerdem die Grundlage vieler Modelle zur Trainingssteuerung. In prozentualer Abhängigkeit zur iANS werden Trainingsgrenzen basierend auf den verschiedenen Energiebereitstellungsprozessen festgelegt und je nach Trainingszielsetzung orientieren sich die Athletinnen und Athleten an diesen Herzfrequenz-Schwellen. Diese Trainingsschwellen werden in Kapitel 2.1.4 genauer beschrieben.

Nach Janssen (2003, S. 19) führt ein Überschreiten der iANS zur Azidose – der Übersäuerung des Körpers durch Milchsäure – und je nach Intensität der Belastung zum unmittelbaren oder verzögerten Leistungseinbruch. Desweiteren hat die Übersäuerung der Muskulatur einige nachteilige Effekte:

- Hohe Milchsäurekonzentration verursachen ein Gefühl der muskulären Ermüdung
- Hohe Milchsäurekonzentration verursacht eine Übersäuerung in und um die Muskelzellen
- Hohe Milchsäurewerte verringern das Koordinationsvermögen
- Erhöhte Verletzungsgefahr
- Das Kreatinphosphatsystem wird durch hohe Milchsäurekonzentration beeinträchtigt.
- Die Fettverbrennung stagniert.

(vgl. Janssen, 2003, S. 19-20)

Der Laktatabbau erfolgt nach dem Training innerhalb von ca. 60-90 Minuten vollständig (Janssen, 2003, S. 20). Für die individuelle Trainingssteuerung sind daher je nach Zielsetzung sowohl niedrige als auch hohe Intensitäten über der iANS geeignet.

2.1.3 MaxLass-Test

Die Obergrenze des zuvor erwähnten Laktat-Steady-State nennt man den maximalen Laktat-Steady-State (MaxLass). An diesem Punkt befindet sich die exakte iANS, da dies genau jene Grenze ist, an der eine weitere Erhöhung der Belastung zu einer Azidose und zu einem Leistungseinbruch führt. Die entsprechende Herzfrequenz kann man mittels MaxLass-Test exakt bestimmen, da im Unterschied zum Laktat-Stufentest keine Geschwindigkeitsstufen, sondern Dauerläufe mit konstanten Geschwindigkeiten solange wiederholt werden, bis die iANS erreicht wird. (vgl. Endler, S. 26-27)

Heck (1990, zit. nach Endler, 2013, S. 26) macht zum Ablauf des MaxLass-Test noch eine wesentliche Ergänzung: „Das maximale Laktat-steady-state entspricht der höchsten Belastungsintensität, bei der Laktatbildung und -elimination im Gleichgewicht stehen oder aber bei der das Laktat in den letzten 20 Minuten der Dauerbelastung um weniger als 1mmol/l ansteigt.“ Dadurch wird ein zeitabhängiger geringer Leistungsabfall in der Berechnung berücksichtigt. Die Dauer der Läufe sollte zwischen 30 und 60 Minuten liegen. Während des Dauerlaufs wird in bestimmten Zeitabständen Blut zur Laktatmessung abgenommen. Endler (2013, S. 27) beschreibt den weiteren Verlauf, abhängig von der Laktatkonzentration:

1. Falls der Sportler während des Dauerlaufs abbrechen musste oder es einen Laktatanstieg von mehr als 1 mmol/l in den letzten 20 Minuten gab, wird die Belastung beim nächsten Dauerlauf leicht reduziert.
2. Falls kein Laktatanstieg während des Dauerlaufs festgestellt wurde, wird die Belastung beim nächsten Dauerlauf leicht erhöht.

Dieser Ablauf wird solange wiederholt, bis der Laktatspiegel unter Berücksichtigung der ersten Bedingung konstant bleibt. So kann die iANS exakt bestimmt werden. Der MaxLass-Test eignet sich zur Leistungsdiagnostik nur bedingt, da die Dauerläufe nicht direkt hintereinander durchgeführt und Trainingseffekte durch die Dauerläufe nicht ausgeschlossen werden können. Das in Kapitel 2.2 vorgestellte PerPot-Modell kann jedoch mit Hilfe des MaxLass-Tests und der vorher ermittelten Leistungsparameter Simulationen zur Ermittlung der iANS durchführen, ohne die Beschränkungen der Regeneration und möglicher Trainingseffekte berücksichtigen zu müssen.

2.1.4 Nutzung der iANS zur Trainingssteuerung

Die ermittelte iANS kann als Grundlage für die Trainingsplanung genutzt werden. Die verschiedenen Trainingsbereiche leiten sich aus den Energiebereitstellungsprozessen ab:

Bereich	Abkürzung	Stoffwechsellaage
Regeneration und Kompensation	REKOM	aerob
Grundlagenausdauer 1	GA 1	aerob
Grundlagenausdauer 2	GA 2	aerob-anaerob
Wettkampfspezifische Ausdauer	WSA	aerob-anaerob bis anaerob
Schnelligkeitsausdauer	SA	anaerob

Abb. 2: Trainingsbereiche im Ausdauersport (Endler, 2013, S. 32).

Die Trainingsbereiche errechnen sich prozentual zur iANS. Jedoch verwenden verschiedene Autorinnen und Autoren unterschiedliche Bereichsgrenzen. Endler (2013, S. 33) begründet dies mit den fließend verlaufenden Grenzen bei den Energiebereitstellungsprozessen. Damit sind einerseits die Übergänge zwischen den Bereichen fließend und die Pulsgrenzen dürfen nicht als starre Grenzen angesehen werden. Die folgende Tabelle zeigt die Trainingsbereiche nach Neumann, Pfützner und Berbalk (2011, S. 143).

Tab. 1: Trainingsbereiche prozentual zur iANS

Bereich	Prozentuale Einteilung
REKOM	<70 %
GA 1	70 - 90 %
GA 2	90 - 95 %
WSA	95 - 105 %
SA	110 - 120 %

Quelle: mod. n. Neumann, Pfützner und Berbalk (2011, S. 143)

Der erste Bereich beschreibt die Schwelle für die Regeneration. Üblicherweise werden Läufe in diesem Bereich nach schweren Wettkämpfen oder am Ende von Trainingseinheiten durchgeführt. Der Grundlagenausdauerbereich – aufgrund seines großen Spektrums meist in zwei Bereiche geteilt – beschreibt den Trainingsbereich, in dem die meisten Trai-

ningseinheiten von Ausdauerläufern absolviert werden. Im Bereich GA 1 sind hauptsächlich die aeroben Stoffwechselprozesse der Glykolyse und Lipolyse aktiv. Durch gezieltes Training in dieser Belastungsstufe können diese Prozesse verbessert werden und so auch bei erhöhter Geschwindigkeit ausreichend Energie bereitstellen. In der GA 2 Belastungsstufe sind sowohl aerobe als auch anaerobe Prozesse beteiligt und Laktat-Aufbau- und Abbau sind ausgeglichen. In diesem Bereich wird trainiert, um die prozentuale Schwelle weiter nach oben zu heben, bei der dieses Gleichgewicht aufrecht erhalten werden kann. Die Bereiche auf bzw. über der iANS werden hauptsächlich für Wettkämpfe und Schnelligkeitsausdauer verwendet. Schnelligkeitsausdauer kann beispielsweise für Zwischen- bzw. Zielsprints oder kurze Distanzen entscheidend sein.

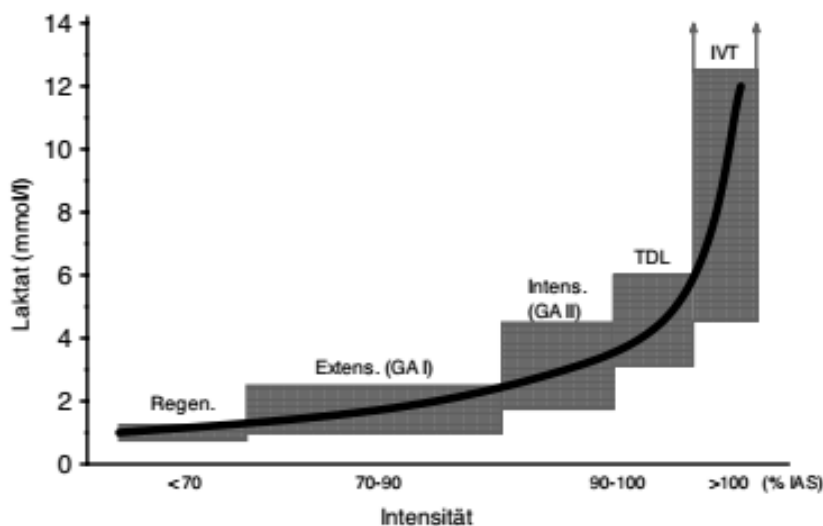


Abb. 3: Trainingsbereiche in Abhängigkeit der IAS (Kindermann, 2004)

Abbildung 3 zeigt die unterschiedlichen Intensitätsbereiche in Relation zur iANS nach Kindermann. Zusätzlich wird dabei der jeweilige Laktatpegel angegeben, wobei diese Werte durchschnittliche Annahmen darstellen. Der letztendliche Laktatpegel bei einer bestimmten Belastung ist individuell und insbesondere die maximale Laktatbelastung kann bei sehr gut trainierten Athletinnen und Athleten wie Sprintern 12 mmol deutlich übersteigen.

2.1.5 Belastungsreaktion im Ausdauersport

Sportliche Betätigung ruft im Körper auf verschiedenen Ebenen Reaktionsprozesse hervor, die eine Folge der Beanspruchung sind. Neumann et al. (2011) beschreiben die Belastung dabei als „die Gesamtheit der von außen auf den Menschen einwirkende Ereignisse, die körperliche und psychische Funktionen verändern“. Training sorgt dementsprechend nicht

nur für physiologische Belastungen bzw. Anpassungen bei den bereits erwähnten Energiebereitstellungsprozessen, sondern beeinflusst den Körper auch auf psychologischer Ebene. Insbesondere direkt nach dem Training ist der Körper in einem reizbedingten Ermüdungszustand, für den der Körper Regenerationszeit benötigt, die über das Training hinaus geht. Die Dauer der Regeneration hängt von Intensität und Dauer der Belastung ab und wird im nachfolgenden Kapitel näher beschrieben.

Der Regenerationsprozess und die Restbelastung sind entscheidend an der Trainingssteuerung beteiligt. Der Körper steht in einer ständigen Wechselbeziehung mit der Umwelt und der Entschluss zur Trainingsbetätigung fällt auf der mentalen Ebene, sie ist der entscheidende Antrieb für das Training. (vgl. Neumann et al., 2011, S. 31)

Fällt die Entscheidung zur sportlichen Tätigkeit, entwirft das Kleinhirn ein Bewegungsprogramm. Nach Neumann et al. (2011, S. 32) sind folgende Systeme beteiligt:

- vegetatives Nervensystem
- Herz-Kreislauf-System
- Energiestoffwechsel
- Hormonsystem
- Immunsystem
- Temperaturregulation
- Wasser- und Elektrolythaushalt

Um eine definierte Leistung zu erreichen, müssen bestimmte konditionelle Niveaus innerhalb dieser Systeme erreicht werden. Wird eine Intensität gewählt, die niedriger als das aktuelle Niveau ist, wird diese nicht als Belastung empfunden. Wird die Intensität zu hoch gewählt, kommt es zu einer Überforderung und es werden zusätzliche Reserven benötigt. Der Körper ermüdet vorzeitig und es kommt zu einem Leistungseinbruch. Zur kontinuierlichen Leistungssteigerung bedarf es einer stetigen Erhöhung der Intensität und ausreichend Pausen. Dieser Prozess der Anpassung beschreibt die Superkompensation, die Weimann (2004, S. 32) als „überschießende Anpassung“ bezeichnet. Der Begriff selbst bezieht sich dabei hauptsächlich auf Anpassungsprozesse im Bereich der Energiestoffwechsels (vgl. Weimann, 2004, S.33), wobei auch innerhalb der anderen Systeme Anpassungsprozesse stattfinden.

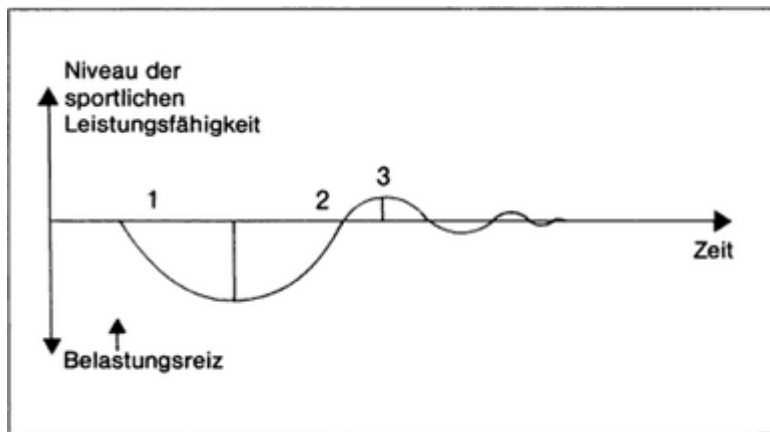


Abb. 4: Entwicklung der Leistungsfähigkeit bei Belastungsreizen (Weineck, 2004, S. 33)

Abbildung 4 beschreibt den Prozess der Belastungsreize durch das Training und die Superkompensation. In der ersten Phase nimmt die Leistungsfähigkeit bedingt durch die Belastung ab. Es wird eine bestimmte Zeit zur Auffüllung der Energiespeicher und zur Regeneration benötigt, um das Ausgangsniveau wieder zu erreichen. Die zweite Phase beschreibt diesen Wiederanstieg der Leistungsfähigkeit, den Erholungszeitraum. In der dritten Phase kommt es zu einer Erhöhung der Leistungsfähigkeit, der sogenannten Superkompensation. Wird der Körper erneut belastet, bevor die Leistungsfähigkeit das Ausgangsniveau erreicht hat und geschieht dies kontinuierlich, gerät der Körper in ein Übertraining. Weimann (vgl. 2004, S. 33) bezieht sich dabei jedoch nur auf die gleiche Belastungsform. Bei einer anders gelagerten Belastung (z.B. Krafttraining nach Lauftraining) ist der Körper belastungsfähiger. Durch eine entsprechende Kombination verschiedener Trainingsarten können Regenerationspausen so optimal genutzt werden. Wird kein Trainingsreiz mehr gesetzt, senkt sich die Leistungsfähigkeit langsam wieder bis zum Ausgangsniveau. Ziel einer Athletin oder eines Athleten ist es, durch ein verbessertes Ausgangsniveau, einer erhöhten Belastung und einer entsprechend gewählten Pause eine kontinuierliche Superkompensation zu erreichen, ohne den Körper dabei zu überlasten.

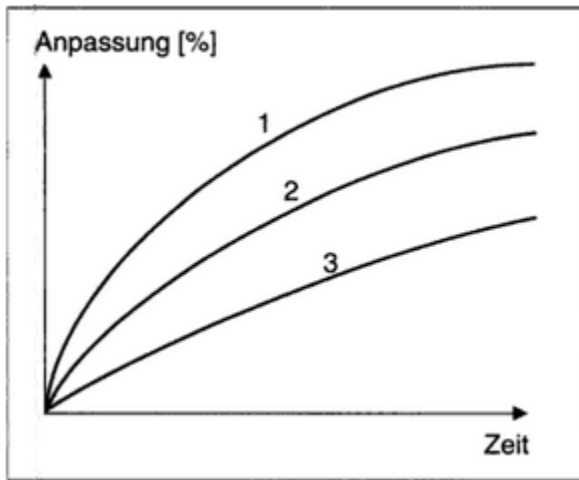


Abb. 5: Adaptionausmaß durch Training (Weineck, 2004, S. 35)

Das Adaptionausmaß durch Training wie in Abbildung 5 dargestellt, unterscheidet sich innerhalb der beteiligten Systeme des Körpers. Eine schnelle Anpassungsfähigkeit besitzen z.B. die Muskulatur und insbesondere die Phosphatspeicher. Bereits nach einzelnen Trainings stellt sich dabei ein Superkompensationseffekt ein. Ein klassisches Beispiel hierfür ist die bewusste Entleerung der Glykogenspeicher und anschließende Superkompensation vor einem Marathon. Ein Beispiel für eine mäßige Anpassungsfähigkeit ist die maximale Sauerstoffaufnahme des Körpers, die sich nur durch kontinuierliche Trainingseinheiten anpasst. Eine langsame Adaption gibt es bei der Anpassung des Halte- und Stützapparates (Weineck, 2004, S. 35). Nach Neumann et al. (2011, S. 33) wird mit einer allgemeinen Anpassung der Leistungsfähigkeit jedoch meist erst nach 4-6 Wochen gerechnet, da ein erhöhtes Leistungsniveau ein störanfälliger Zustand ist und sich erst stabilisieren muss.

2.1.6 Erholung im Ausdauersport

Belastung, Leistungsfähigkeit, Schlaf und Ausgangsniveau sind nur einige Faktoren die maßgeblichen Einfluss auf die Regeneration nach einem Wettkampf haben. Insbesondere die Belastung, also die Geschwindigkeit und die gelaufene Distanz, entscheiden über die Dauer bis zur vollständigen Regeneration. So erholt man sich beispielsweise von einem 5-km-Lauf in Wettkampftempo relativ rasch, bei einem Marathon rechnet man aber mit mindestens 14 Tagen Regenerationszeit und mindestens 7 Tagen Trainingspause für eine vollständige Regeneration (vgl. Moss, Murf & Pierce, 2008, S. 131). Die Berücksichtigung von Belastungs- und Entlastungsphasen spielt eine entscheidende Rolle zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit. Wird ständig eine neue Belastung gesetzt, bevor die Erholung vollständig war, gerät der Körper langfristig in ein Übertraining und ein langfristiger Leistungseinbruch ist die Folge. Auch das Ausgangsniveau spielt eine wesentliche Rolle bei der Dauer der Regeneration. Je trainierter eine Athletin oder ein Athlet ist – die Leistungsfähigkeit zu Beginn der Belastung also höher ist – desto weniger empfindet der Körper eine bestimmte Intensität als Belastung und desto niedriger sind die nötigen Regenerationsmaßnahmen. Nach Moss (et al., 2008, S. 132) unterscheidet man bei der Regeneration zwischen aktiver und passiver Regeneration. Die passive Regeneration beschreibt alle körperinternen Prozesse zur Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit. Bei der aktiven Regeneration werden bewusste Maßnahmen zur Förderung der Regeneration gesetzt. Z.B. führen Athletinnen und Athleten direkt nach dem Wettkampf größere Mengen an Energie zu, um den Körper mit Nährstoffen zu versorgen. In den Tagen nach einem Wettkampf werden sogenannte Regenerationsläufe mit niedrigerer Intensität durchgeführt. In verschiedenen Mannschaftssportarten und auch im Laufsport wird die Kaltwasserimmersion (Eisbad) genutzt, um Mikrotraumata direkt nach der Belastung zu verhindern und eine verbesserte Regeneration zwischen Training oder Wettkampf zu erreichen. Auch das Auslaufen nach einer Einheit soll zur Regeneration beitragen, indem mit einer gut gewählten Intensität dafür gesorgt wird, dass der Blutfluss zum Muskel erhöht wird, aber kein überschüssiges Laktat produziert wird. Bei der Tour de France gehört nach einer Etappe das abendliche Ausfahren auf einem Radergometer zur täglichen Wettkampfregeneration.

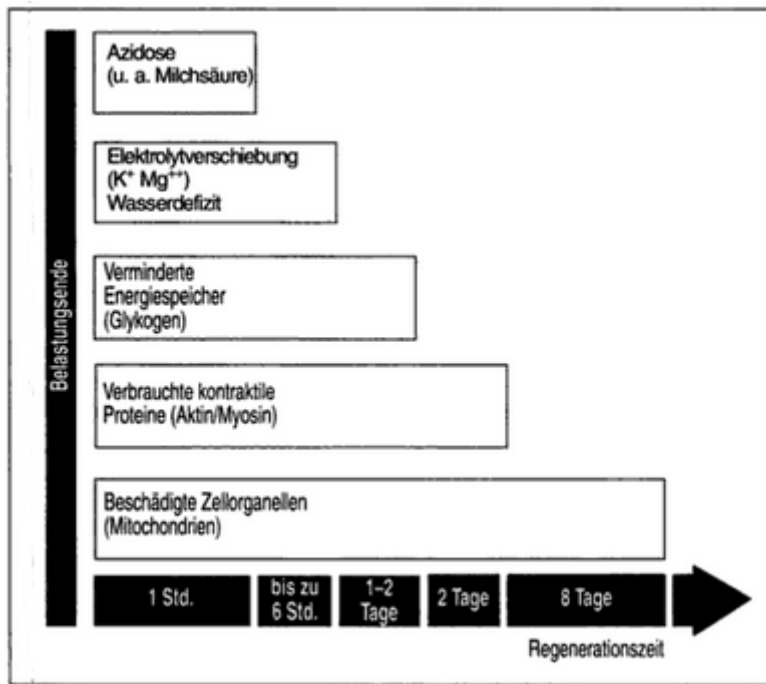


Abb. 6: Die unterschiedlichen Regenerationszeiten biologischer Teilsysteme (Weineck, 2004, S. 35)

Die unterschiedlichen Regenerationszeiten nach Weineck werden in Abbildung 6 dargestellt. Zu erkennen ist, dass bereits direkt nach dem Training in allen Teilsystemen die Regeneration beginnt. Daher ist es sinnvoll, den Körper mit ausreichend Nahrung und Flüssigkeit direkt nach dem Training bzw. Wettkampf zu unterstützen. Während der Laktatabbau und die Wiederherstellung des Wasser- und Energiehaushalts (mit Ausnahme der Glykogenspeicher) sehr schnell erfolgen, können Zellschädigungen bis zu 6 Tage Regeneration benötigen. Neumann, Pfützner und Hottenrott (2010, S. 494) beschreiben die verschiedenen Etappen bei der Regeneration nach einem Training oder Wettkampf etwas detaillierter. 4-6 Minuten nach einer Belastung sind die Phosphatspeicher (ATP, Kreatin) nahezu vollständig aufgefüllt. Nach 60-90 Minuten haben sich die unmittelbaren Effekte wie gesteigerte Herzfrequenz und muskelabbauende (katabole) Prozesse wieder normalisiert und der Körper beginnt mit der Einleitung der Proteinsynthese zur Regeneration. Nach einem Tag hat sich der Wasserhaushalt wieder normalisiert und das Leberglykogen wurde wieder aufgefüllt. Bei 2-3 Tagen ist das Muskelglykogen wieder in den Zellen und es stellt sich ein Superkompensationseffekt des Glykogenspeichers ein, d.h. es besteht nachher eine höhere Speicherkapazität als vorher. Nach 3-4 Tagen hat sich das Immunsystem vollständig erholt und eine längere Regenerationszeit wird nur nach starken Belastungen wie z.B. einem Marathon benötigt.

2.1.7 Einfluss der Umgebungsfaktoren auf die Herzfrequenz im Ausdauersport

Die Herzfrequenz während einer sportlichen Ausdauereinheit und die damit in Zusammenhang stehende Leistungsfähigkeit hängen nicht nur stark von internen Parametern, sondern auch von äußeren Umweltfaktoren ab und können starken Einfluss auf die Leistungsfähigkeit nehmen. Die wesentlichen Einflussfaktoren im Laufsport sind Wetter, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und das Streckenprofil. Ein rutschiger Untergrund oder eine Steigung führen zu einer direkten Erhöhung der Herzfrequenz, bedingt durch den erhöhten mechanischen Aufwand. Die Veränderungen des Wetters und der Temperatur haben indirekt über die Körpertemperatur Einfluss auf die Leistungsfähigkeit.

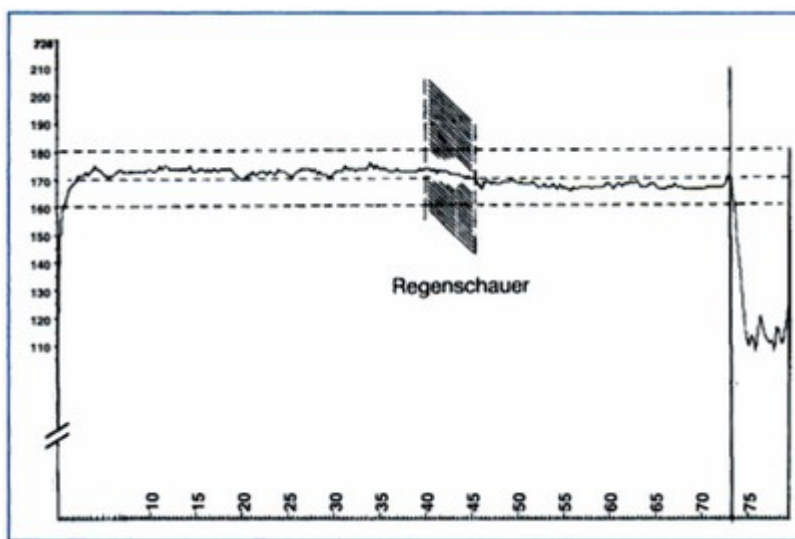


Abb. 7: Einfluss der Außentemperatur auf die Herzfrequenz während eines Halbmarathonlaufs (Janssen, 2003)

Abbildung 7 zeigt den Herzfrequenz-Verlauf eines Marathon-Läufers bei einsetzendem Regen ab ca. Minute 40. Vor Beginn des Regenschauers war die Herzfrequenz noch deutlich über 170 Schlägen, anschließend ist ein deutlicher Abfall in der Herzfrequenz messbar. In einem weiteren Beispiel (Janssen, 2003) wurde der Ruhepuls während eines 15-minütigen Saunabesuchs gemessen. Dabei erhöhte sich der Ruhepuls von 50 Schlägen auf über 90 Schläge pro Minute.

Die Leistungsfähigkeit wird durch die Umgebungstemperatur und die Luftfeuchtigkeit beeinflusst. Für jede Belastung gibt es optimale Parameter. Über das Wärmeregulationszentrum kann die Körpertemperatur entsprechend den Umweltbedingungen angepasst werden. Bei einer Erhöhung der Körpertemperatur laufen die Regulierungsprozesse schneller ab, bei einer niedrigeren Temperatur langsamer. Die Regulierungsprozesse wirken sich direkt auf die Herzfrequenz aus. (vgl. Janssen, 2003, S. 68)

Nach Janssen (2003, S. 68) beträgt die optimale Außentemperatur, d.h. die Temperatur, bei der die Herzfrequenz unter Belastung am niedrigsten ist, 20 °C. Eine interne Erhöhung der Körpertemperatur um 1 °C führt zu einer Zunahme der Herzfrequenz um 10 bis 15 Schläge pro Minute. Erhöht sich die Körpertemperatur weiter auf bis zu 41 °C, z.B. bei einem Marathon mit hoher Außentemperatur und hoher Luftfeuchtigkeit, sowie vernachlässigter Flüssigkeitszunahme, droht ein Hitzeschlag. Daher ist bei längeren Ausdauerdistancen für eine stetige Flüssigkeitszunahme zu sorgen. Janssen (2003, S. 68-69) erklärt, dass bei hohen Außentemperaturen bei Wettkämpfen innerhalb einer Stunde bis zu 3% des Wassers im Körper verbraucht werden und dies zu einem reduzierten Blutfluss führt, der über eine erhöhte Herzfrequenz kompensiert werden muss.

Bei gleichbleibenden hohen Umgebungsbedingungen führt die Belastung zu einer stetig steigenden Herzfrequenz. Steigt die Temperatur bzw. die Luftfeuchtigkeit jedoch weiter an, führt dies zu einer reduzierten Leistungsfähigkeit und trotz interner Regulierungsprozesse zu einem Anstieg der Körpertemperatur. Eine erhöhte Körpertemperatur ist ein deutlich leistungsreduzierender Faktor. Je nach Art der Ausdauertätigkeit unterscheidet sich jedoch die optimale Außentemperatur. Während für lange Ausdauerläufe die erwähnten 20 °C optimal sind, werden für Schnellkrafteinheiten wie z.B. den Sprint 25 °C bis maximal 35 °C empfohlen. Werden Wettkämpfe in einem anderen Klima absolviert, z.B. die Olympischen Spiele 2016 in Rio, sollten sich Athletinnen und Athleten an das Wetter im Vorhinein akklimatisieren. Dabei kann durch Training bei hohen Umgebungstemperaturen die Schweißproduktion von ca. 1.8 Liter auf bis zu 3.5 Liter gesteigert und die Hitzeresistenz verbessert werden. Es werden mindestens 10 Tage, besser jedoch drei bis vier Wochen zur Akklimatisierung empfohlen. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass Trainingsumfang und Intensität langsam an das eigentliche Niveau herangeführt werden. Nach vier bis acht Wochen geht der Akklimatisierungs-Effekt wieder verloren. (vgl. Janssen, 2003, S. 68-70)

Auch bei stabilen und optimalen Bedingungen hat der Flüssigkeitshaushalt bzw. der Flüssigkeitsverlust während der sportlichen Tätigkeit Einfluss auf die Herzfrequenz. Abbildung 8 zeigt die Herzfrequenzentwicklung bei einer Ausdauereinheit über 120 Minuten. Der Flüssigkeitsverlust führt zu einer reduzierten Leistungsfähigkeit und einer erhöhten Laufzeit von ca. 40 Minuten. Der nachteilige Effekt stellte sich bei Läufen jedoch erst ab ca.

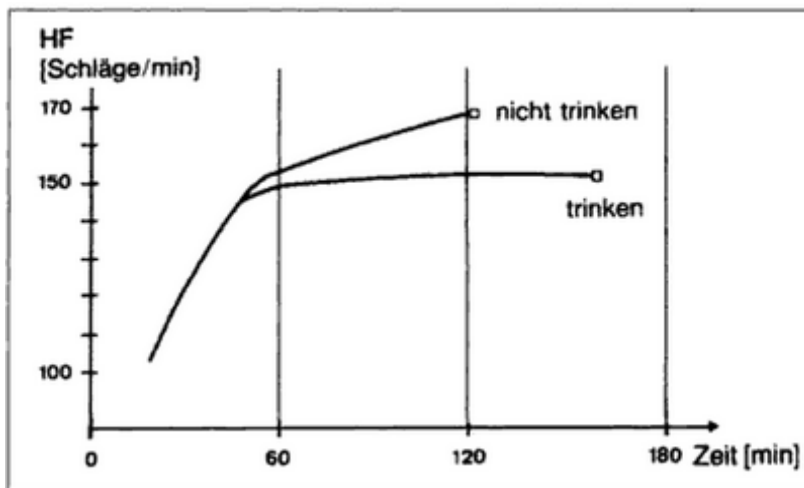


Abb. 8: Einfluss von Flüssigkeitsverlust auf die Herzfrequenz (Janssen, 2003, S. 78)

Minute 50 ein. Bei einem kürzeren intensiveren Lauf wird jedoch mehr Wärme freigesetzt und der negative Effekt tritt früher auf. Einen ähnlichen Effekt, jedoch mit positiver Wirkung auf die Leistungsfähigkeit, hat eine Kühlung während einer Ausdauertätigkeit, z.B. mit Hilfe eines Ventilators vor einem Radergometer. Der Kühlungseffekt ist bei höheren Geschwindigkeiten außerdem größer, daher wirken sich höhere Temperaturen beim Laufen negativer aus als beim Radfahren. Auch die Seehöhe hat Einfluss auf die Herzfrequenz und kann akklimatisiert werden. Bei 2000 Meter Seehöhe erhöht sich die Ruhe-Herzfrequenz um 10%, bei 4500 Meter Seehöhe bereits um 50%. (vgl. Janssen, 2003, S. 77-80)

2.2 Performance Potential Modell (PerPot)

Das PerPot-Modell wurde Ende der 1990er Jahre von Prof. Perl entwickelt und unter dem deutschen Namen Leistung-Potential Modell (LeiPot) veröffentlicht und später in PerPot umbenannt (vgl. Endler, 2013, S. 37). Der ursprüngliche Zweck war, verschiedene Wechselwirkungen zwischen Belastungen und Leistungen zu beschreiben. Da diese Wechselwirkungen in verschiedenen Systemen auftreten können – Endler (2013, S. 37) nennt hier explizit die Sportphysiologie und Medizin – wurde das Modell als Meta-Modell konzipiert, um es für verschiedene Formen von Leistung und Belastung anpassen zu können.

Die Belastung beeinflusst dabei die Leistung antagonistisch, d.h. die zentrale Eingabegröße, die Belastung wirkt über Potentiale (Ermüdung und Erholung) sowohl negativ als auch positiv. Entsprechende Verzögerungsraten beeinflussen dabei das Leistungspotential. Dadurch lassen sich viele sportphysiologische Prinzipien wie die Superkompensation beschreiben. (vgl. Tampier, Endler, Novatchkov, Baca & Perl, 2011)

Endler, (2013, S. 38) nennt den Kollaps-Effekt, die umgekehrte U-Funktion und den asymptotischen Leistungsverlauf als weitere physiologische Adaptionprozesse, die mittels PerPot modelliert werden können. Die Darstellung der Adaptionprozesse war eine erste konkrete Anwendung des PerPot-Modells. Gegenüber statischen Trainingsmodellen bietet das dynamische PerPot-Modell den Vorteil der Individualisierung. So kann ein bestimmtes Trainingspensum eine Unterforderung bedeuten, während das gleiche Trainingspensum bei einer anderen Athletin oder einem anderen Athleten eine Überforderung darstellt. Mit Hilfe des PerPot-Modells lassen sich diese Individualitäten berücksichtigen und modellieren. (vgl. Endler, 2013, S. 38). Mittlerweile wurde das Basis-Modell an verschiedene Sportarten adaptiert und bereits in den Bereichen Handball, Laufen, Schwimmen und im Schulsport eingesetzt.

2.2.1 Basis-Metamodell

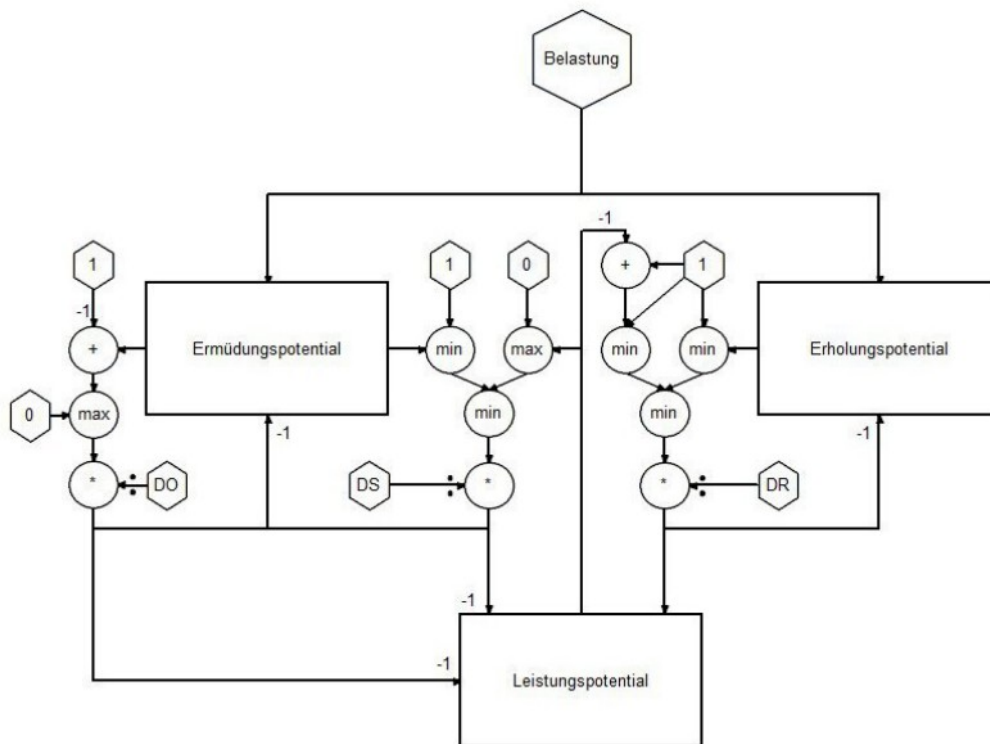


Abb. 9: Schematische Darstellung des Basis-Metamodells PerPot (Endler, 2013, S. 39)

Die Belastung bildet den Ausgangspunkt des Basis-Modells und steht daher in der Abbildung 9 ganz oben. Je nach Simulation können für die Belastung reale Werte oder simulierte Werte eingegeben werden. Grundsätzlich können diese Werte sowohl positiv als auch negativ sein, wobei die im Laufsport verwendete Belastung, die Geschwindigkeit der Läuferin bzw. des Läufers nur 0 oder größer sein kann. Die Belastung steht in Beziehung mit dem Leistungspotential. Durch das Ermüdungspotential und das Erholungspotential wird das Leistungspotential beeinflusst, wobei das Ermüdungspotential abbauend auf das Leistungspotential und das Erholungspotential aufbauend wirkt. Sie stellen also eine Art Zwischenspeicher zwischen Belastung und Leistungspotential dar. Zur Vereinfachung werden die Potentiale auf das Intervall $[0,1]$ begrenzt. Daher ist es notwendig, die tatsächlichen Ein- und Ausgabewerte auf dieses Intervall anzupassen. Die Pfeile stellen die Flussrichtungen und Flussraten dar. Die tatsächlichen Flussraten werden durch Verzögerungsparameter wie z.B. der Erholung und der Ermüdung beeinflusst. (vgl. Endler, 2013, S. 39–40)

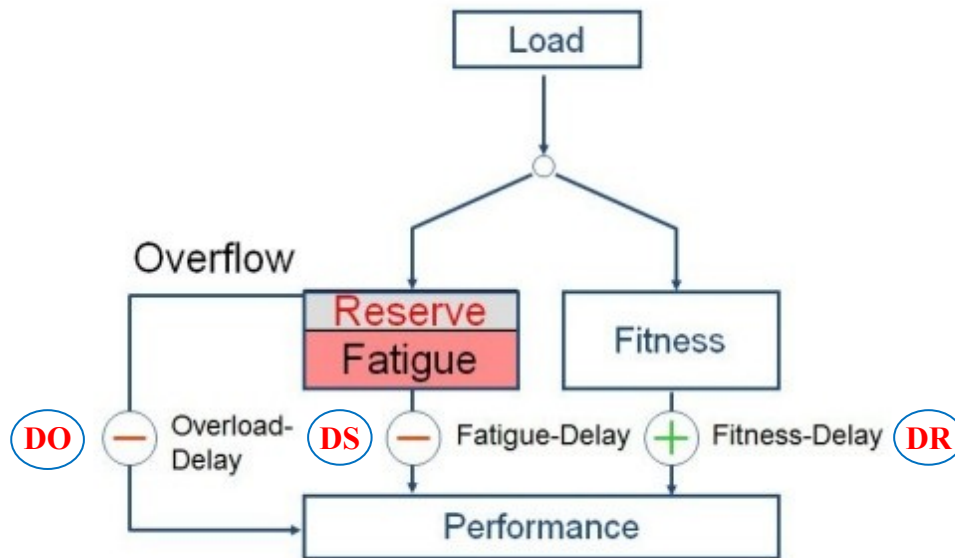


Abb. 10: Vereinfachte Darstellung PerPot Modell (mod. nach Tampier et al., 2011)

Abb. 10 zeigt eine vereinfachte Darstellung des PerPot-Modells, in der sich das Ermüdungspotential aus Ermüdung und Reserve zusammensetzt. Dies ist notwendig, da im Modell ein Überlastungsmechanismus berücksichtigt wird. Wenn die Ermüdung ein Limit überschreitet, wird ein weiterer stark negativer Belastungseffekt ausgelöst, der mit Verzögerung, bis das Reservepotential ausgeschöpft ist, einen Kollaps, also einen vollständigen Performance-Einbruch auslöst. Die Größe und die Stärke der Überschreitung des Limits entscheiden dabei, wie schnell der Effekt eintritt. Das gesamte Ermüdungspotential kann außerdem genutzt werden, um ein Belastungs- und Leistungslimit zu simulieren. Für die Simulation von Training und Wettkampf wird versucht, dieses Ermüdungspotential vollständig auszunutzen, ohne dass es dabei die Reserve 0 unterschreitet. (vgl. Tampier et al., 2011).

Das Plus-Zeichen zwischen Fitness und Performance und das Minus-Zeichen zwischen Reserve und Performance beschreiben den Einfluss auf die Performance und die Pfeile stellen die Flussrate dar, mit der die Potentiale schrittweise erhöht bzw. verringert werden. DS (Delay of Strain) und DR (Delay of Response) stellen dabei die Verzögerungsfaktoren dar, mit der die Potentiale wirken, wobei die Verzögerungsfaktoren unterschiedlich groß sein können. Zur Modellierung wird die Flussrate durch die Verzögerungsfaktoren dividiert, um eine lineare Flussrate zu erhalten. DO (Delay of Overload) stellt die zeitliche Verzögerung der Überlastung dar, wobei diese in der Regel deutlich kürzer ist als DS, so dass bei Aktivierung der Überbelastung eine Leistungsminderung unmittelbar erfolgt. Die Performance stellt die Ausgabegröße dar. (vgl. Endler, 2013, S. 40-41)

Die Veränderung des Leistungspotentials wird nicht nur durch die Flussraten des Ermüdungs- und des Erholungspotentials errechnet, sondern kann sich auch aus dem aktuellen Bestand des Leistungspotentials ergeben. Die Rate ergibt sich aus dem Minimum des Ermüdungs- und des Leistungspotentials. Analog dazu kann die Rate, mit der das Leistungspotential positiv beeinflusst wird, vom Erholungspotential der Restkapazität bis zum Maximum des Leistungspotentials abhängen. Das Minimum der beiden Größen wird gewählt. (vgl. Endler, 2013, S. 41)

Im Folgendem werden die von Endler (2013, S. 41) genannten und dem PerPot-Modell zu Grunde liegenden Differenzgleichungen näher beschrieben. Mit diesen Gleichungen können die unterschiedlichen Potentiale und Flussraten errechnet werden, wobei zusätzliche Minimum und Maximum Operationen aufgrund des verwendeten Intervalls [0,1] berücksichtigt sind:

Symbole und Abkürzungen

SR...Strain Rate	SP...Strain Potential	DS...Delay of Strain
RR...Recovery Rate	RP...Recovery Potential	DR...Delay of Response
OR...Overload Rate	OP...Overload Potential	DO...Delay of Overload
t...time	Δt ...Interval of time	
min...minimum	max...maximum	

Ermüdungsrate (SR):

$$SR[t, t + \Delta t] = \min(\min(1, SP[t]), \max(0, PP[t])) / DS$$

Wählt das Minimum des Strain Potential oder des Performance Potential zum Zeitpunkt t. Die Division durch DS erzeugt eine lineare Flussrate.

Erholungsrate (RR):

$$RR[t, t + \Delta t] = \min(\min(1, RP[t]), \min(1, 1 - PP[t])) / DR$$

Wählt das Minimum des Response Potential oder des Performance Potential zum Zeitpunkt t. Die Division durch DR erzeugt eine lineare Flussrate.

Zur Berechnung des Kollaps-Effekt wird ein Überlauffluss konstruiert. Voraussetzung ist, dass das Ermüdungspotential ausgeschöpft ist, d.h. 1 erreicht hat. Durch weitere Belastungszugabe wird das Ermüdungspotential überschritten. Die Überlaufrate errechnet sich

dabei aus der Differenz des aktuellen Ermüdungspotentials und des maximalen Ermüdungspotentials. (vgl. Endler, 2013, S. 43)

Überlaufrate (OR):

$$OR[t, t + \Delta t] = \max(0, SP[t] - 1) / DO$$

Die Maximum-Funktion wird mit einer NULL-Option ausgestattet. Für den Fall, dass das Ermüdungspotential noch nicht ausgeschöpft worden ist, soll keine Überlauffunktion verwendet werden. Die Division durch DO erzeugt eine lineare Flussrate.

Zur Berechnung des Leistungspotentials müssen die Flussraten nun entsprechend der abgelaufenen Zeit t addiert bzw. subtrahiert werden:

$$PP[t + \Delta t] = PP[t] + \Delta t \cdot (RR[t, t + \Delta t] - SR[t, t + \Delta t] - OR[t, t + \Delta t])$$

Eine weitere wichtige Kontrollgröße ist die Reserve, die sich aus der Differenz des maximalen Ermüdungspotentials 1 und des derzeitigen Ermüdungspotentials ergibt.

Reserve:

$$R[t] = 1 - SP[t]$$

Wird die Reserve negativ, tritt eine Überlastung ein. Diese Kontrollgröße eignet sich daher in Simulationen zur Optimierung und Ausschöpfung des vollen Leistungspotentials.

Im Bezug auf den Laufsport können am Basis-Modell Vereinfachungen in der Berechnung vorgenommen werden. Durch die Festlegung auf ein stets positives Leistungspotential, fällt die Maximum-Operation der Ermüdungsrate und die Minimumfunktion der Erholungsrate weg. Dadurch vereinfacht sich die Berechnung des jeweiligen Potentials (Endler, 2013, S. 45):

Ermüdungsrate:

$$SR[t, t + \Delta t] = \min(1, SP[t], PP[t]) / DS$$

Erholungsrate:

$$RR[t, t + \Delta t] = \min(1, RP[t], 1 - PP[t]) / DR$$

2.2.2 Delay of Atrophy

Nach Endler (2013, S. 46) muss für den Einsatz des PerPot-Modells bei Langzeitwettkämpfen die Langzeitatrophie berücksichtigt werden. Er nennt hier 30 Minuten Ausdauersport als Grenze, ab der die Berechnungen des Modells angepasst werden müssen. Damit sollen die Kohlenhydratspeicher, die sich während eines Laufes abbauen und sich negativ auf die Leistungsfähigkeit auswirken, modelliert werden. Zwar kann dieser Effekt während eines Wettkampfes durch kurzkettige Kohlenhydrate, wie z.B. Maltodextrin, reduziert, aber nicht verhindert werden. Sind die Kohlenhydratspeicher erschöpft, folgt eine Umstellung bei der Energiebereitstellung. Weineck (2004, S. 142) nennt hier den Bereich der ersten 30 Minuten, der sich überwiegend durch den Glukose-Metabolismus kennzeichnet und den Bereich von 30-90 Minuten als Mischbereich, in dem sowohl der Glukose- als auch der Fettstoffwechsel aktiv sind.

Perl, Dauscher & Hawlitzky (2003) nennen hier 2 unterschiedliche Typen von Atrophie:

- Temporäre Atrophie
- Langzeitatrophie

Nach Endler (2013) wird die temporäre Atrophie über den verzögerten Rückfluss des Leistungspotentials in das Erholungspotential modelliert. Das Leistungspotential reduziert sich dadurch temporär, das Erholungspotential erhöht sich und bewirkt eine verzögerte größere Erhöhung des Leistungspotentials. Ein Beispiel hierfür stellt z.B. eine Temporeduzierung im Laufen dar. Die Atrophie wirkt nur temporär und nach kurzer Zeit stellt sich wieder der Normalzustand her.

Die dauerhaft wirkende Atrophie stellt eine Performance-Potential Reduzierung dar und muss daher mit einer eigenen negativen Flussrate modelliert werden. In Abbildung 9 könnte man die Atrophie z.B. unterhalb des Leistungspotentials als Abfluss platzieren. Die Reduzierung des Performance-Potentials führt zu einer Erhöhung des Ermüdungs- und des Erholungspotentials, wodurch bei konstanter Belastung langfristig eine Überlastung erzeugt wird, die das Erschöpfen der Kohlenhydratspeicher simuliert. Anschließend muss eine Belastungsreduzierung erfolgen, indem die Geschwindigkeit reduziert wird. Die Atrophie wird durch die Atrophie-Verzögerungsrate dividiert, um eine lineare Abflussrate zu erhalten. (vgl. Endler, 2013) Die angepasste Formel zur Errechnung des Performance-Potentials muss die Atrophie ebenfalls berücksichtigen:

$$PP[t + \Delta t] = PP[t] + \Delta t \cdot (RR[t, t + \Delta t] - SR[t, t + \Delta t] - OR[t, t + \Delta t] - AR[t, t + \Delta t])$$

2.2.3 Kalibrierung

Zur Simulation von Training und Wettkampf mittels PerPot-Modell müssen die Parameter individuell an die Athletinnen und Athleten angepasst werden. Dazu benötigt man entweder Trainingsdaten oder einen Kalibrierungslauf, aus denen die Verzögerungsraten und Leistungspotentiale abgeleitet werden können.

Perl & Mester (2001) nennen die wesentlichen Parameter, die kalibriert werden müssen:

- Belastungsverzögerung DS
- Erholungsverzögerung DR
- Überlaufverzögerung DO
- Atrophie DA
- Belastungspotential-Kapazität
- Leistungspotential-Kapazität

Zur Festlegung der Parameter wird ein Kalibrierungsverfahren benötigt, bei dem die Wechselwirkungen zwischen Geschwindigkeit und Herzfrequenz beobachtet werden können. Die Trainingseinheit muss verschiedene Geschwindigkeiten beinhalten, die für eine ausreichend lange Zeit gehalten werden, damit sich die Herzfrequenz anpassen kann. Zur Feststellung der Leistungskapazität muss ein breites Spektrum an Geschwindigkeiten abgedeckt werden. Die Veränderung der Herzfrequenz bei Geschwindigkeitsanpassungen unterscheidet sich je nach individuellem Leistungsstand der Athletinnen und Athleten, daher ist eine individuelle Kalibrierung notwendig. Zur Modellierung einer typischen Situation im Laufsport, dem Leistungseinbruch aufgrund einer zu hoch gewählten Startgeschwindigkeit, muss daher zumindest einmal eine Überlastung erzeugt werden. Dadurch können die individuellen Leistungsparameter der Athletinnen und Athleten genauer ermittelt werden. (vgl. Ender, 2013, S. 50)

2.2.4 PerPot-Stufentest

Zur Feststellung der im vorherigen Kapitel genannten Parameter soll der Stufentest verschiedene Geschwindigkeitsbereiche abdecken. Abhängig vom Lauf-Niveau der Probandinnen und Probanden werden 6 km/h, 7 km/h oder 8 km/h als Startgeschwindigkeit gewählt. Alle 3 Minuten wird das Tempo um 1 km/h, 1,5 km/h oder 2 km/h analog zu den vorher genannten Startgeschwindigkeiten erhöht. Dies gewährleistet, dass die Probandinnen und Probanden eine Kalibrierungs-Dauer von ca. 15-20 Minuten erreichen. Würde beispielsweise eine Athletin oder ein Athlet, die/der erst bei 18 km/h ausbelastet ist, mit 6 km/h starten, müsste sie bzw. er 39 Minuten laufen, um die Kalibrierung zu beenden. Unter Berücksichtigung der zuvor genannten physiologischen Anpassungen im Bereich der Energiebereitstellungsprozesse sollte daher die Grenze von maximal 20-25 Minuten bei einem Kalibrierungslauf nicht überschritten werden. Wird diese Zeit dennoch überschritten, muss der Kalibrierungslauf wiederholt werden.

Die Geschwindigkeitssteigerungen erfolgen im Abstand von 3 Minuten solange, bis die Athletin bzw. der Athlet das vorgegebene Tempo mehrere Sekunden durchgehend um mindestens 3 km/h unterschreitet. Da dies normalerweise erst passiert, wenn die Probandin bzw. der Proband nahe an seine Leistungsgrenze kommt, ist gewährleistet, dass zumindest kurzzeitig eine Belastung im anaeroben Bereich vorliegt. Endler (vgl. 2013, S. 51) hebt dabei die Wichtigkeit hervor, dass Parameter gefunden werden, die einen Überlauf – also eine Reserve unter Null – erzeugen, da diese eine verbesserte Simulationsgenauigkeit im Hinblick auf eine Ausbelastungssituation bedeutet.

Der in Kapitel 2.2.2 beschriebene Parameter Delay of Atrophie wird im Kalibrierungslauf nicht berücksichtigt, da von einer Laufzeit von weniger als 30 Minuten ausgegangen wird und somit keine Langzeitausdauerbelastung vorliegt. Eine Überschreitung dieser Laufzeit würde somit zu ungenauen Daten führen.



Abb. 11: PerPot-Kalibrierungslauf P20

Abbildung 11 zeigt einen typischen Kalibrierungsverlauf zur Ermittlung der individuellen Parameter. Die Daten konnten sehr gut verwendet werden, da P20 die Vorgaben des Systems genau befolgt hat. Beim Übergang von der höchsten Stufe (16 km/h) zum Auslaufmodus (8 km/h) gibt es eine Abweichung der Vorgaben. Diese kurzfristigen Geschwindigkeitsabweichungen können jedoch vernachlässigt werden, da eine gewisse Übergangszeit nach Geschwindigkeitsanpassungen vom System berücksichtigt wird. Problematisch sind dauerhafte Geschwindigkeitsabweichungen und dauerhaft wechselnde Geschwindigkeiten. Eine weitere Bedingung ist, dass zumindest 4 Geschwindigkeitsstufen – Startgeschwindigkeit und 3 Steigerungen – gelaufen werden, damit die Parameter ausreichend genau bestimmt werden können. Eine konstante Einhaltung der Geschwindigkeiten ist wichtig, damit der Zusammenhang mit der Herzfrequenz festgestellt werden kann. Die Verzögerungsparameter ergeben sich insbesondere aus den Geschwindigkeitsanpassungen bei den Stufenerhöhungen, sowie beim Übergang zum Auslauftempo. Wird zum Auslauftempo gewechselt, muss die Startgeschwindigkeit nochmals für 3 Minuten gelaufen werden.

Nach Absolvierung des Laufes werden die Daten nach einem Gütemaß bewertet. Das Gütemaß hat einen Wert zwischen 1 (optimale Datei) und 6 (nicht verwendbare Datei).

Endler (vgl. 2017) beschreibt im folgenden die Kriterien sowie mögliche Einflussfaktoren des Gütemaßes:

- 1 – Fehlerlose Daten. Sehr gute Eignung für die PerPot-Kalibrierung
- 2 – Leicht fehlerhafte Daten. Die Fehler sind jedoch vernachlässigbar und haben keinen Einfluss auf die Kalibrierung, z.B. leichte Geschwindigkeitsabweichungen.
- 3 – Deutlich fehlerhafte Daten, z.B. stärkere Geschwindigkeitsabweichungen oder Schwankungen. Eine Kalibrierung basierend auf diesen Daten ist mit Vorsicht zu genießen.
- 4 – Gravierend fehlerhafte Daten. Eine Kalibrierung ist zwar möglich, die Aussagekraft der Daten jedoch zweifelhaft.
- 5 – Die Kalibrierungsdaten sind so schlecht, dass es sich nicht mehr um einen Stufentest nach den genannten Kriterien handelt.
- 6 – Keine Güteklasse bestimmbar. Datensätze fehlen, z.B. wenn Pulssensor oder Footpod ausfallen.

Mögliche Fehlerquellen:

- Die vorgegebenen Geschwindigkeiten schwanken zu stark.
- Puls oder Geschwindigkeit weichen vom normalen Verlauf ab, z.B. durch Messfehler.
- Der Puls und die Geschwindigkeit sind asynchron. Beispielsweise sollte sich der Puls erst nach einer Geschwindigkeitserhöhung anpassen und nicht davor.
- Es sind unterschiedlich viele Geschwindigkeits- und Pulsdaten vorhanden.

Der in Abbildung 11 dargestellte Geschwindigkeitsverlauf zeigt eine Kalibrierung, die mit dem Gütemaß 1 bewertet wurde. Die Geschwindigkeitsstufen wurden sehr gut eingehalten und die neue Geschwindigkeit nach einer Erhöhung schnell stabilisiert. der Proband bzw. die Probandin hielt sich an die Vorgaben und eine Abweichung beim Übergang der höchsten Stufe zur Auslaufstufe kann vernachlässigt werden.

2.2.5 Simulation der iANS mit PerPot

Wurden die Parameter durch einen Kalibrierungslauf ermittelt, startet PerPot-Simulationsläufe zur Ermittlung der individuellen anaeroben Schwelle (iANS). Die Schwelle ist die Herzfrequenz, wo der Laktat-Steady-State (MaxLass) gerade noch gehalten werden kann. Der Laktat-Steady-State definiert sich wie folgt:

„Das maximale Laktat-steady-state entspricht der höchsten Belastungsintensität, bei der Laktatbildung und -elimination im Gleichgewicht stehen oder aber bei der das Laktat in den letzten 20 Minuten der Dauerbelastung um weniger als 1mmol/l ansteigt. (Heck, 1990; zit. n. Endler, 2013, S. 26)

Um den MaxLass zu bestimmen, bedient man sich des MaxLass-Tests. Dazu werden mehrere 45-minütige Dauerläufe mit bestimmten Geschwindigkeiten an verschiedenen Trainingstagen durchgeführt und in verschiedenen Abständen Laktat gemessen. Die Geschwindigkeit der Dauerläufe wird solange angepasst, bis eine maximale Geschwindigkeit erreicht wird, bei der das Laktat konstant bleibt.

Dieses Prinzip der konstanten Dauerläufe mit verschiedenen Geschwindigkeiten wird nun vom PerPot genutzt, um die iANS zu bestimmen. Die Reserve dient hier als Maß zur Beurteilung der Läufe. Ist die Reserve am Ende der Läufe unter Null, ist dies gleich zu setzen mit einer Geschwindigkeit, die für einen stetig steigenden Laktatspiegel sorgt. Dann wird die Geschwindigkeit reduziert. Ist die Reserve größer als Null, war die Geschwindigkeit zu niedrig. Die Simulation wird wiederholt, bis die Reserve nach 45 Minuten genau null ist. Die simulierte Herzfrequenz am Ende des Laufes ist die iANS. (vgl. Endler, 2013, S. 52)

Zur Validierung dieser Methode wurde an der Johannes Gutenberg Universität Mainz eine Vergleichsstudie zwischen der berechneten iANS durch Laktatmessung und der PerPot-Methode durchgeführt. Dazu führte eine Gruppe von 14 Basketball-Spielern einen Stufentest durch. Dabei wurden alle notwendigen Parameter, wie Geschwindigkeit, Herzfrequenz und Laktat gemessen. Die Rahmenbedingungen, unter der die Studie durchgeführt wurde, können in der Dissertation von Endler (2013, S. 67–75) nachgelesen werden. Es wurden verschiedene Laktat-Messungsmethoden mit der PerPot-Methode verglichen. Bei allen Messungsmethoden wurde ein korrelativer Zusammenhang von $r > 0,8$ zwischen Laktattest und PerPot-Berechnung festgestellt. Der höchste korrelative Zusammenhang wurde mit der Laktat-Methode von Keul erzielt. Der Zusammenhang betrug $r = 0,874$. (vgl. Endler, 2013, S. 73)

2.2.6 Simulation der Wettkampf-Zielzeit

Zur Ermittlung der optimalen Startgeschwindigkeit für eine spezifische Wettkampfdistanz, wird ein ähnliches Prinzip wie beim MaxLass-Test angewendet. Über mehrere Simulationen wird die Startgeschwindigkeit solange verändert, bis die gewählte Geschwindigkeit so optimal ist, dass die Reserve am Ende des Laufes genau Null ist. Ein weiteres Kriterium ist die iANS, die während der Simulation nicht überschritten werden darf. Dies würde ebenfalls eine Überforderung verursachen. Die Geschwindigkeit wird daher in Simulationen solange erhöht, bis beide Bedingungen erfüllt sind und dies bei einer weiteren Erhöhung nicht mehr der Fall wäre. (vgl. Endler, S. 55)

Zur Simulation des optimalen 10-km-Laufes wird ein konstantes Tempo als Pacing-Strategie angenommen. Nach Ender (2013, S. 54) „ist es für die Sportlerinnen und Sportler am einfachsten zu steuern und bietet die besten Zielzeiten“. Zudem sind wettkampfstrategische Maßnahmen, wie etwa Zwischensprints für diese Studie nicht relevant, da die Läufe alleine durchgeführt werden. Berücksichtigt werden muss jedoch die Anpassung der Herzfrequenz bei Läufen, die über 30 Minuten dauern. Laut Endler (2013, S. 54) erhöht sich die Herzfrequenz bei Langzeitausdauerläufen mit Fortdauer sukzessive. Dies kann im PerPot-Modell entweder durch eine Anpassung des DS oder des DR berücksichtigt werden. Eine Erhöhung des Verzögerungsparameters DS bewirkt eine reduzierte Ermüdungsrate und daher ein erhöhtes Leistungspotential. Dies erhöht die Herzfrequenz in den Simulationen. (vgl. Endler, 2013, S. 55)

Zur Festlegung des optimalen DS-Startwertes und des DS-Verlaufes reichen die Kalibrierungsdaten nur bedingt aus. Sie liefern zwar einen DS-Startwert, dieser unterliegt jedoch den Kontextbedingungen wie Temperatur und Wetter, die zwischen Kalibrierungslauf und Wettkampf unterschiedlich sein können.

Ein festgelegter Wert von 0.1 pro Stunde konnte nur zum Teil gute Ergebnisse bringen. Darauf hin analysierte Endler (2013, S. 56). Kalibrierungs- und Wettkampfdaten. Dazu wurden Wettkampfsimulationen mit den Kalibrierungswerten und verschiedenen DS-Startwerten durchgeführt. Der DS-Wert bei der Simulation, bei der die Herzfrequenz-Abweichung am niedrigsten war, ergab den DS-Wert. So konnten bereits verbesserte Simulationen entwickelt werden. Da es sich jedoch um Mittelwerte pro Stunde handelte, wurden individuelle Gegebenheiten der Athletinnen und Athleten nicht berücksichtigt. (vgl. Endler, 2013, S. 56–57).

Zur weiteren Optimierung können Trainingsdaten von Langzeitausdauereinheiten herangezogen werden. Jedoch lassen sich damit ebenfalls keine wettkampfspezifischen Gegebenheiten wie Temperatur oder Wetter simulieren. Endler (2013, S. 58) hebt den Einfluss der Temperatur hervor: „Ist die Temperatur während eines Trainingslaufes deutlich höher als während des zugrundeliegenden Stufentests, dann wird auch die Herzfrequenz höher sein, wodurch auch die prozentuale Steigung des Verlaufs betroffen ist“. Werden mehrere Trainings- und Wettkampfdaten zur Simulation verwendet, erzeugt dies lediglich einen Durchschnittswert der äußeren Bedingungen. Zur Lösung dieses Problems kann die Echtzeit-Datenübertragung des im folgenden Kapitel vorgestellten MMA genutzt werden. Mit dem DS Startwert des Kalibrierungslaufes wird die erste Simulation durchgeführt. Während des Wettkampfes werden die Daten gesammelt und der DS-Wert an die unterschiedlichen Kontextbedingungen angepasst. (vgl. Endler, 2013, S. 58)

Während die Startsimulation über die volle Wettkampfdistanz durchgeführt wurde, analysiert die Echtzeitsimulation lediglich die Restdistanz zur Anpassung des DS-Wertes. Damit muss nur noch die Reststrecke optimiert werden. Zusätzlich wird der bereits absolvierte Teil in der Simulation mit den originalen Geschwindigkeiten simuliert. Dies kann jedoch dazu führen, dass die Reserve zum Start der neuen Simulation bereits unter null gefallen ist, z.B. wenn Warnungen einer Geschwindigkeitsüberschreitung ignoriert wurden. (vgl. Endler, 2013, S. 62)

Dadurch würde nach Endler (2013, S. 62) „die Simulation der Reststrecke immer mit einer negativen Reserve starten und keine weitere optimale Wettkampfsimulation ergeben. Daher sind die ersten 1,5 Minuten von der Erfüllung der Bedingung ausgenommen, sodass die Reserve durch eine niedrigere Geschwindigkeit zunächst aus dem Reservetief in den positiven Bereich zurückkehren kann“. Die letzte Minute wird ebenfalls nicht berücksichtigt, um einen Schlusssprint zu simulieren (vgl. Endler, 2013, S. 62).

Während des Wettkampfes wird die Zielzeit –wenn notwendig –im Abstand von 5 Minuten angepasst. Die Athletin bzw. der Athlet erhält eine Nachricht über die neue Zielzeit und die Anpassung der Geschwindigkeit. Zusätzlich wird alle 15 Sekunden eine Warnung übermittelt, wenn die Geschwindigkeit mehr als 0.3 km/h von der vorgegebenen Geschwindigkeit abweicht oder die iANS überschritten wird. Endler (2013, S. 63) erklärt, dass sich die iANS im ersten Optimierungsdurchlauf durchaus verändern kann, sich in weiterer Folge aber praktisch nicht mehr weiter anpasst.

3 Mobile Coaching

Mit den steigenden Digitalisierungsmöglichkeiten von Training und Wettkampf steigen auch die Ansprüche an die Trainingsoptimierung. Viele Athletinnen und Athleten im Profibereich, aber auch immer mehr Amateure, messen ihre Daten und speichern diese mit Hilfe moderner Technik wie z.B. einer Laufuhr oder einem Powermeter im Radsport. Immer häufiger kommt es dabei vor, dass diese Daten von den Athletinnen und Athleten nicht selbst analysiert werden, sondern über eine Online-Plattform externe Trainerinnen und Trainer hinzugezogen werden und basierend auf diesen Daten das weitere Training geplant wird. Meist erfolgen diese Vorgänge noch manuell, d.h. die Athletin oder der Athlet muss selbst die Daten auf den Computer übertragen und auf die entsprechende Plattform hochladen. Hinzu kommt, dass diese Daten immer nur nach dem Training zur Verfügung stehen und beispielsweise in einer langen Trainingseinheit keine Anpassungen gemacht werden können. Ein Echtzeit-Analyse und Feedback-Tool gibt es nicht. Aus diesem Grund hat die Universität Wien eine Software-Applikation, den Mobile Motion Advisor (MMA) entwickelt. Ziel des MMA ist es, verschiedene Sensoren und zentralisierte Analyse- und Feedbacktools zu kombinieren, um die Athletinnen und Athleten bei Training und Wettkampf zu unterstützen. Über ein Feedback-System können so in beinahe Echtzeit Anpassungen basierend auf den gesammelten Daten der Sensoren vorgenommen werden. (vgl. Baca, Kornfeind & Tampier, 2013)

Baca (et al., 2013) nennen hier einige Vorteile, die ein solches System bringen kann:

- Assistenz während sportlicher Aktivität
- Verbesserung der Trainingsleistung
- Überlastungen vermeiden
- Verbesserte Motivation durch individuelles Feedback (z.B. Schulklasse)

Die Trainerinnen und Trainer können über eine Online-Plattform und ein Feedback-Modul mit den Athletinnen und Athleten kommunizieren und deren Training anpassen, ohne selbst vor Ort zu sein. Ein Vorteil ist außerdem, dass damit viele Athletinnen und Athleten gleichzeitig betreut werden können. Mit zusätzlichen Analyse- und Feedbackmodulen kann das Coaching auch ohne Trainerinnen und Trainer automatisiert werden.

So bietet der MMA eine Basis-Applikation, die dann individuell für verschiedene Sportarten angepasst werden kann.

Figure 1. Framework of the server-based Mobile Coaching System.

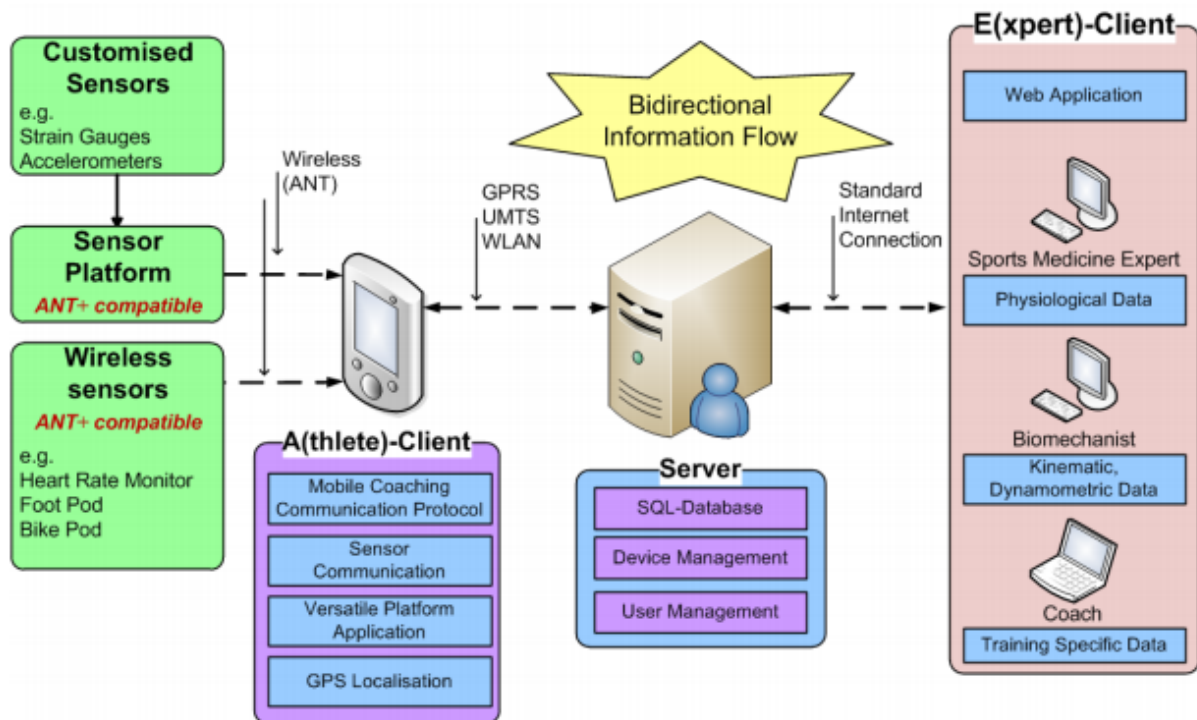


Abb. 12: Aufbau des Mobile Coaching Systems (Baca et al., 2010, S. 10643)

In der Abbildung 12 wird der schematische Aufbau des MMA dargestellt. Je nach Sportart trägt die Probandin bzw. der Proband verschiedene Sensoren zur Messung biomechanischer oder physiologischer Messgrößen wie z.B. die Geschwindigkeit oder die Herzfrequenz. Diese Sensoren sind via Ant+ Protokoll mit einem Ant+ fähigem A-Client, z.B. einem Smartphone, verbunden. Ant+ ist ein kabelloses Übertragungsprotokoll, vergleichbar mit USB, dass im Bereich der Messdaten-Erfassung verbreitet ist. Es arbeitet so wie Wifi und Bluetooth auf der Frequenz von 2.4 Ghz. Baca et al. (vgl. 2010, S. 10645) nennen folgende Vorteile, die das Ant+ Protokoll für die Sensormesstechnik bietet:

- Niedriger Batterieverbrauch, bis zu 3 Jahre Batterielaufzeit
- Datenrate bis zu 1 Mbps
- bis zu 125 RF Channels zur Übertragung, um die korrekte Datenleitung sicherzustellen.
- Verschiedene Netzwerktypen werden unterstützt

Der Hauptvorteil von Ant+ gegenüber Bluetooth war bisher der niedrigere Energieverbrauch bei der Datenübertragung. Namhafte Hersteller wie z.B. Garmin setzten daher bisher auf das Ant+ Protokoll. Seit der Entwicklung neuerer Bluetooth-Protokolle wie BT 4.0

und BT 4.2 Smart werden die Sensoren von den Herstellern auch mit Bluetooth ausgerüstet. Aktuelle Smartphones sind daher oft mit beiden Protokollen ausgestattet. Eine Anpassung des MMA, je nachdem welcher Standard sich zukünftig durchsetzt, ist möglich.

Es können jedoch nicht alle Sportarten mit Ant+ Sensoren abgedeckt werden, daher kann für diesen Fall eine Sensorplattform (Baca et al., 2010) mit einem integrierten Ant-Modul verwendet werden. Damit können verschiedene Sensortypen und Signale zusammengefasst und als Ant+ Paket an den A-Client versendet werden (vgl. Baca et al., 2010). Die genaue technische Beschreibung der Einzelkomponenten findet man in Baca et al. (2010). Die für diese Laufstudie verwendeten Sensoren arbeiten mit dem Ant+ Protokoll und können daher ohne eine solche Sensorplattform verwendet werden.

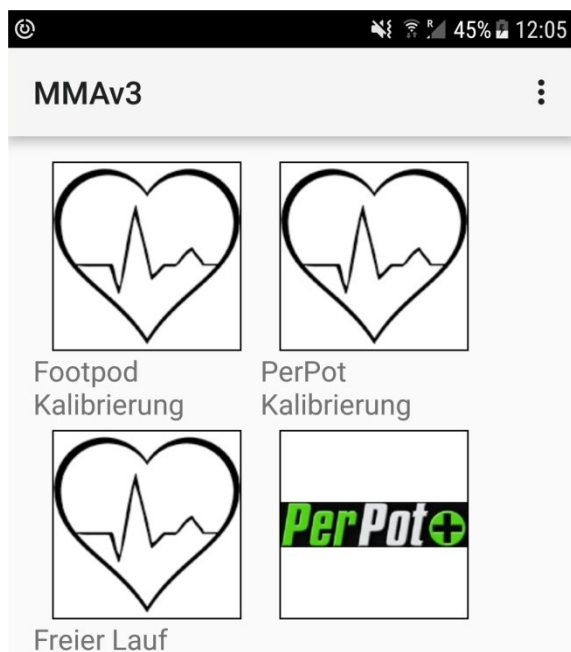


Abb. 13: Mobile Motion Advisor Version 3

Abbildung 13 zeigt die aktuelle Version 3 des MMA, so wie sie im Smartphone benutzt werden kann. Mit einer mobile Datenverbindung oder WLAN steht das Smartphone in ständigem Datenaustausch mit dem Server. Nach einem Login in die Applikation können vom Server die individuellen Konfigurationsdaten abgerufen und während der Absolvierung eines Laufes Daten an den Server übermittelt werden. Dort werden die Daten in einer Datenbank gespeichert und es können gleichzeitig Anweisungen vom Server an den Probanden – so genanntes Echtzeit-Feedback – übermittelt werden. In dieser Version des MMA erhalten die Athletinnen und Athleten während des Laufens in regelmäßigen Abständen Feedback-Nachrichten. Bei einer Abweichung ab 0.3 km/h wird alle 15 Sekunden eine Audio-Information über die Höhe der Abweichung übermittelt. Auch die Geschwin-

digkeits-Erhöhung wird über die Audio-Funktion des Smartphones wiedergegeben. Zu Beginn und am Ende eines Laufes werden ebenfalls Informationen des Servers an den A-Client übermittelt und wiedergegeben.

Mobile Motion Advisor
Der Sport Analyser

bmwfw
Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft

personal data team actual sessions **diary** training programm manager Reports help impress

Tagebuch
Filteroptionen

activity: all name: all Von: 15.06.2016 Bis: 21.06.2016 Filtern

Legende
This is a club-session

[download actual tables in CSV-format](#)

name	group	date	time [H:ms]	activity	Ø pulse [min ⁻¹]	downloads & details
P1 P1	Privat	21.06.2016, 12:58:28	00:49:26	distance run (perpot)	186	
P1 P1	Privat	21.06.2016, 12:08:04	00:00:21	distance run (perpot)	0	
P1 P1	Privat	18.06.2016, 11:57:41	00:48:59	distance run (free)	189	
P1 P1	Privat	18.06.2016, 11:08:00	00:00:34	distance run (free)	134	
P1 P1	Privat	18.06.2016, 11:07:15	00:00:05	distance run (free)	143	
P1 P1	Privat	18.06.2016, 11:06:17	00:02:09	distance run (free)	165	
P1 P1	Privat	18.06.2016, 10:59:17	00:00:06	distance run (free)	133	

Abb. 14: Grafische Benutzeroberfläche des Mobile Motion Advisor

Die in Abbildung 14 dargestellte grafische Benutzeroberfläche ermöglicht die Darstellung und Analyse der gespeicherten Daten, sowie Livebeobachtung und Echtzeit-Trainingsanpassungen. Jede Messung der Geschwindigkeit und Pulsfrequenz wird in der Datenbank gespeichert und kann über die grafische Oberfläche betrachtet werden. Die Daten können in verschiedenen Formaten heruntergeladen oder exportiert und vom Server gelöscht werden. Bei der Livebeobachtung der Läuferinnen und Läufer können die aktuellen Pulsdaten, die aktuelle Geschwindigkeit und die zurückgelegte Distanz, sowie die bisherige Dauer des Laufes betrachtet werden. GPS-Daten zeigen außerdem die bisher zurückgelegte Laufstrecke. Über ein Nachrichten-Interface kann man mit den Läuferinnen und Läufern kommunizieren und über das Smartphone per Audioausgabe Nachrichten wiedergeben lassen. Somit hat die Trainerin bzw. der Trainer die Möglichkeit der vollständigen Echtzeit-Trainingskontrolle, ohne vor Ort zu sein.

Mit dem MMA kann jedoch nicht nur mobile Trainingssteuerung erfolgen. Mit Hilfe intelligenter Feedback-Systeme, können automatisierte Nachrichten übermittelt und Trainingsanpassungen in Echtzeit realisiert werden.

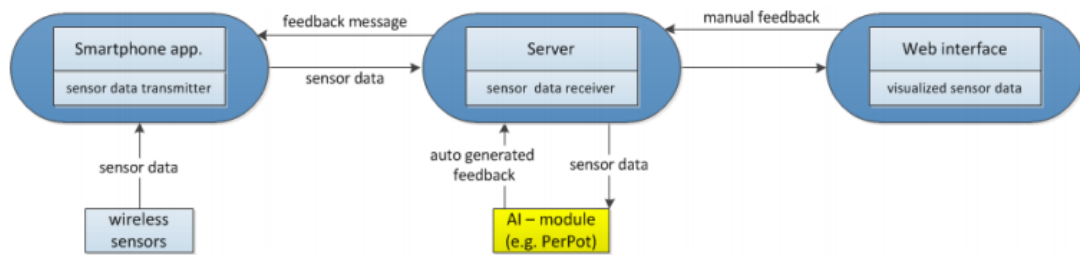


Abb. 15: Erweiterung des MMA mit Modulen zur automatischen Auswertung der Daten (Tampier et al., 2011).

Hierfür macht man sich zu Nutze, dass das System nicht nur Daten in die eine Richtung, also die Speicherung der Messdaten, sondern auch Feedback in die andere Richtung senden kann. Abbildung 15 beschreibt diesen Vorgang grafisch. Ist das System aktiviert, werden die von den Sensoren gesammelten Daten an den MMA übermittelt und von dort über eine mobile Datenverbindung oder WLAN an den Server übermittelt. Ein intelligentes Feedback-System, das mit dem Server gekoppelt ist, analysiert die Daten, simuliert etwaige Anpassungsmöglichkeiten und sendet Feedback an den A-Client, dem Smartphone der Probandin bzw. des Probanden zurück. Über den MMA und der Audiofunktion des Smartphones können dann Anweisungen direkt an die Probandin oder den Probanden übermittelt werden. Die in dieser Arbeit präsentierte Studie wurde mit dem automatisierten Feedback-Modul PerPot durchgeführt, das mit dem MMA gekoppelt wurde und dessen Funktionsweise in weiterer Folge detailliert beschrieben wird.

3.1 Mobile Coaching Protokoll

Zur Übertragung von Messdaten der Sensoren muss das Smartphone Ant+ fähig sein und die entsprechende Software installiert werden. Um diese gesammelten Messdaten übertragen zu können, wurde das Mobile Coaching Protokoll (MC) entwickelt (Baca et al., 2010, S. 10648). Das MC-Protokoll ist für die Kommunikation zwischen MMA und Server, sowie für die Datenübertragung der Messdaten die von den Ant+ Sensoren gemessen werden, verantwortlich. Grundsätzlich erlaubt das MC-Protokoll auch die Verwendung von anderen Übertragungsprotokollen wie Bluetooth, die aktuelle Version 3 des MMA ist jedoch für die Verwendung von Ant+ angepasst. (vgl. Baca et al., 2010, S. 10648-10649)

Das MC-Protokoll erlaubt insgesamt 9 Übertragungs-Anfragen:

Tab. 2: Nachrichten-Formate des MC-Protokolls

#	Funktion
1	Requesting available institutions (e.g., clubs, schools)
2	Requesting current training session corresponding to an institution (including setup information about autostart and autostop of training on the A-Client)
3	Requesting members of a corresponding institution
4	Requesting general client hardware settings (e.g., device type, baud rate, GPS availability, frequency of sending data to server)
5	Requesting ANT+ network keys
6	Requesting ANT+ sensor setup (sensor name, sensor type, ANT channel, ANT network, further sensor parameters following the ANT protocol)
7	Sending sensor data to the server (plus requesting feedback messages)
8	Start / stop training
9	Pause / resume training

Quelle: mod. n. Baca et al. (2010)

Anhand der Funktionen in Tabelle 2 lässt sich ableiten, welche Nachrichten mit dem MC-Protokoll übertragen werden können und wie der Funktionsrahmen der verschiedenen Nachrichten-Formate ist. Je nach Bedarf kann die Funktionspalette angepasst oder erweitert werden. Über die HTTP-Post Methode können Anfragen gestellt werden. Z.B. bedeutet

eine Typ 6 Anfrage, Informationen über die verwendeten Sensoren zu erhalten. Diese wird z.B. ausgelöst, wenn die Benutzerin bzw. der Benutzer im MMA einen Lauf auswählt. Der MMA benötigt daraufhin u.a. Informationen über die verwendeten Laufsensoren. Eine Typ 7 Anfrage sendet die Daten zum Server und erwartet als Antwort eine Feedback-Anweisung. Die Daten werden mittels TCP übertragen. Eine Übertragung mittels UDP würde zwar Leistungsvorteile bei der Übertragungsgeschwindigkeit bringen, jedoch möglicherweise zu fehlerhaften Datensätzen führen. Mit der Handshake-Methode des TCP-Protokolls wird eine hohe Datenkonsistenz erreicht. Damit aber nicht nach jeder Sensor-Datenmessung eine neue Verbindung aufgebaut werden muss, werden mehrere Sensordaten zwischengespeichert, zusammengefasst und anschließend in einer Anfrage übermittelt. Im MC-Protokoll ist diese Möglichkeit im Nachrichten-Format 7 berücksichtigt und das Intervall, mit dem Nachrichten übermittelt werden, definiert. Ein Übertragungsintervall von 10 Sekunden zeigt eine ausreichende Datensicherheit. (vgl. Baca et al. 2010, S. 10649-10652)

In einer Untersuchung (Baca. et al. 2010, S. 10655) zeigte sich sowohl Indoor als auch Outdoor während der Bewegung eine ausreichende Übertragungsleistung, um das System für Sportarten wie Laufen oder Radfahren zu verwenden. Eine Möglichkeit, einen Leistungsengpass bei der Übertragung zu umgehen, wäre die Zwischenspeicherung aller Daten und vollständige Übertragung nach dem Training. Diese Methode erlaubt jedoch keine Live-Datenanalyse. Die aktuelle Version 3 des MMA überträgt die Daten live, ist jedoch mit dieser Funktion ausgestattet, sodass die Daten zusätzlich gesichert sind, falls die Verbindung unterbrochen wird. Werden Daten mittels Nachrichten-Format 7 an den Server übermittelt und in der Datenbank gespeichert, wird zusätzlich eine Feedback-Anfrage gestellt. Diese Anfrage löst ein auf dem Server installiertes Feedback-Modul aus. Das Feedback-Modul greift auf die Daten in der Datenbank zu, analysiert die Daten anhand vorgegebener Parameter und modelliert etwaige Anpassungen für die Athletinnen und Athleten. Die jeweiligen Anpassungen werden als Antwort an den MMA übermittelt und entweder visuell dargestellt oder über die Audio-Funktion wiedergegeben.

3.2 Technische Anpassung PerPot und MMA

Zur Implementierung des Feedback-Moduls muss das MC-Protokoll mit dem Server gekoppelt werden. Dadurch können Geschwindigkeits- und Herzfrequenzdaten ausgetauscht werden sowie Feedback-Nachrichten an den A-Client zurück übermittelt werden.

Nach Baca et al. (2013) wurde der MMA außerdem mit der Unique-Binding-Funktion ausgestattet, sodass nur die Sensoren der Athletinnen und Athleten gekoppelt sind und nicht fälschlicherweise Daten von weiteren Läuferinnen und Läufern, die sich in der Nähe aufhalten, gespeichert werden. Zur einfachen Handhabung der Applikation werden nur die für das Laufen notwendigen Menü-Optionen angezeigt. Die Anzeige beschränkt sich auf die im Laufsport verwendeten Parameter Herzfrequenz und Geschwindigkeit. Die absolvierte Laufzeit wird ebenfalls angezeigt.

Für die in dieser Arbeit präsentierten Studie wurden die Distanzläufe mit der Distanz 10 km angelegt, sodass hier keine Anwendungsfehler passieren können, etwa durch Verwechslung des Längenmaßes. Der Kalibrierungslauf muss in der Applikation des MMA installiert werden und an den Laufsport angepasst werden. Das PerPot-Metamodell wird entsprechend den gemessenen Parametern aus dem Kalibrierungslauf ebenfalls an den Laufsport angepasst, um die ermittelten Daten zur Berechnung von Zielzeiten verwenden zu können. Ein Webinterface, wie in Abbildung 10 dargestellt, ist zwar nicht zwingend notwendig, erleichtert jedoch die Datenanalyse und Auswertung der Probandinnen und Probanden.

3.3 Anpassung des Modells an den Laufsport

Um den MMA im Laufsport benutzen zu können, müssen laufsportspezifische Daten gemessen und verarbeitet werden können. Hierfür wurden Fußsensoren (FootPod) zur Messung der Schrittfrequenz, Distanz und Geschwindigkeit und ein Brustgurt zur Messung der Herzfrequenz verwendet. Die Distanz- und Geschwindigkeitsmessung mit Hilfe von GPS ist ebenfalls möglich, verursacht jedoch teilweise große Abweichungen. Eine GPS-Übertragung ist außerdem anfällig für Ausfälle, wenn z.B. keine GPS-Ortung möglich ist.

3.3.1 Herzfrequenzmesser

Primär wird die Herzfrequenz in BPM (Beats per Minute) und die Zeit zwischen den Herzschlägen mit einer Frequenz von 4 Hz gemessen und verwendet. In Verbindung mit der Herzfrequenz und der Verzögerung können weitere Kenngrößen wie z.B. die aktuelle physiologische Belastung gemessen werden. (vgl. Baca et al., 2010)

Die ermittelte aktuelle Herzfrequenz wird über Ant+ an den MMA übermittelt, am Server gespeichert und der Athletin bzw. dem Athleten über das Display des Smartphone visuell angezeigt.

3.3.2 Footpod

Der Fußsensor wird auf einem Schuh der Athletin bzw. des Athleten befestigt und zählt die Schritte während des Laufens. Über eine einmalige Kalibrierung (z.B. 1200 Meter) wird ein individueller Anpassungswert ermittelt, um die tatsächliche Schrittlänge zu berechnen. Über Schrittfrequenz und Schrittlänge kann dann die Geschwindigkeit und die Distanz abgeleitet werden. Eine weitere Möglichkeit den Fußsensor zu kalibrieren ist, den Kalibrierungsfaktor mit den GPS-Daten abzugleichen. Die Geschwindigkeits- und Distanz-Parameter werden mit 2 HZ bzw. 4 HZ gemessen (vgl. Baca et al., 2010). Die aktuelle Geschwindigkeit ist ebenfalls am A-Client sowie am Webclient sichtbar.

4 Studie

4.1 Untersuchungsdesign

Die Studie wurde von der Ethikkommission der Universität Wien genehmigt und in Zusammenarbeit mit der Abteilung Biomechanik, Bewegungswissenschaft und Sportinformatik durchgeführt.

Zur Beantwortung der Forschungsfragen sollten zumindest 30 Probandinnen und Probanden an 3 verschiedenen Testtagen den Leistungstest, die PerPot-Läufe sowie die Vergleichsläufe absolvieren. Die Probandinnen und Probanden mussten zwischen 18 und 45 Jahre alt sein und einen 10-km-Lauf in zumindest 60 Minuten schaffen. Das Geschlecht spielte dabei keine Rolle. Ein Anamnesebogen wurde von jeder Teilnehmerin bzw. jedem Teilnehmer ausgefüllt, um die Studien-Ergebnisse im Gesamtkontext betrachten zu können.

Um die Objektivität der Daten zu gewährleisten, wurde vorgegeben, dass der Stufentest zumindest 2 Tage vor einem 10-km-Lauf absolviert wird und zwischen den 10-km-Läufen zumindest 4 Tage liegen, höchstens aber 2 Wochen, um einen Superkompensationseffekt durch Training auszuschließen. Die Regenerationsdauer nach einer Wettkampfbelastung und die vorgeschlagene Pause zwischen den Läufen wird in Kapitel 2.1.6 beschrieben. Desweiteren musste sichergestellt werden, dass sowohl der Leistungstest als auch die 10-km-Läufe ohne Vorermüdung absolviert werden. Insbesondere am Vortag eines Laufes war es daher untersagt, schweres Training zu absolvieren. Dies und weitere Instruktionen wurden auf einem Informationsblatt festgehalten, das den Probanden mitgegeben wurde.

Die Laufstrecke spielte grundsätzlich keine Rolle, sie musste jedoch ein ebenes Profil aufweisen und beide Läufe mussten auf der selben Strecke absolviert werden. Die 10-km-Läufe konnten von den Probandinnen und Probanden selbstständig absolviert werden. Für größtmögliche Objektivität musste jedoch darauf geachtet werden, dass äußere Faktoren möglichst keinen oder geringen Einfluss auf die Laufzeiten haben. In Kapitel 2.1.7 wurde bereits eingehend auf den Einfluss der Umgebungsfaktoren im Ausdauersport hingewiesen.

Die beiden 10-km-Läufe wurden randomisiert durchgeführt. Dabei wurde den Probandinnen und Probanden eine Nummer zwischen 1 bis 30 zugelost. Ungerade Zahlen starteten mit dem freien Lauf und gerade Nummern mit dem PerPot-Lauf zuerst. Der Perpot-Lauf wurde mit aktiviertem PerPot-Feedbackmodul des MMA absolviert. Das Feedbackmodul war für die Vorgaben der Geschwindigkeit im PerPot-Lauf zuständig. Der freie Lauf wur-

de zwar ebenfalls zur Aufnahme der Daten mit der vollständigen PerPot-Ausrüstung absolviert, während des Laufes erhielten die Probandinnen und Probanden jedoch kein Feedback zur Anpassung der Geschwindigkeit.

4.2 Probandinnen und Probanden

Für die Untersuchung wurden 34 Sportlerinnen und Sportler im Alter zwischen 19 und 42 Jahren getestet, darunter ein Spitzensportler und mehrheitlich Hobbysportlerinnen und Hobbysportler. Einige Teilnehmerinnen und Teilnehmer, haben längere Zeit keinen Laufsport mehr betrieben, waren aber früher Läufer.

Insgesamt konnten 26 der 34 Probandinnen und Probanden ihre Läufe erfolgreich absolvieren und gültige Datensätze liefern. Die nachfolgenden Statistiken und Auswertungen beziehen sich daher ausschließlich auf diese vollständigen Datensätze. Die anthropometrischen Daten der Teilnehmerinnen und Teilnehmer sind in folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tab. 3: Anthropometrische Daten der Probandinnen und Probanden

TeilnehmerInnen	Alter	Größe in cm	Masse in kg	BMI
N= 18	Männer			
$\bar{x}$	25,6	183,9	77,2	22,8
$\pm s$	5,8	6,3	6,9	1,5
N= 8	Frauen			
$\bar{x}$	26,0	167,1	56,4	20,1
$\pm s$	2,9	5,6	6,4	1,5

Es handelt sich um keine eindeutig homogene Probandengruppe und die zuvor erläuterten Teilnahmebedingungen wurden bei der Auswahl berücksichtigt.

4.3 Durchführung Kalibrierungslauf

Im Vorfeld der Studie wurde die Ausrüstung, die Applikation und der technische Ablauf der Läufe getestet. Dabei zeigte sich, dass insbesondere die Durchführung des PerPot-Stufentests problematisch sein würde. Selbst bei mehrmaliger Durchführung lieferten über 50% der Läufe keine ausreichend verwertbaren Daten hinsichtlich der Beurteilung nach Güteklassen wie in Kapitel 2.2.4 beschrieben. Problematisch war dabei die unkonstante Geschwindigkeit während der Stufen und die Geschwindigkeitsanpassung bei den Stufenübergängen. In bisherigen Studien wurden die Leistungstests stets am Laufband durchgeführt oder von einem Tempomacher unterstützt, womit dieses Problem nicht auftrat und die Geschwindigkeit sehr gut gehalten werden konnte. Aus Gründen der Objektivität – die Leistung am Laufband ist nur bedingt vergleichbar mit der Leistung im freien Feld – und da die Applikation in Zukunft auch in der Praxis zum Einsatz kommen soll, wurde das Laufband nur als Notfallvariante betrachtet. Es zeigte sich bei mehrmaliger Durchführung des PerPot-Stufentests, dass durch die Zuhilfenahme eines optischen Feedbacks zusätzlich zum auditiven Feedback bei wiederholten Stufentests nahezu 100% der Läufe und bei entsprechender Einweisung auch Erstversuche zu 75% erfolgreich waren. Umgesetzt wurde dieses optische Feedback über die Geschwindigkeitsanzeige am PerPot-Smartphone. Die Display-Anzeige wurde optimiert – insbesondere bei starker Sonneneinstrahlung benötigt es eine deutlich hellere Anzeige – und die Probandinnen und Probanden mussten das Smartphone für den Stufentest in der Hand halten. Nur in einzelnen Fällen führte dies zu Problemen bei den Kalibrierungsläufen. Zukünftig könnte man zur einfacheren Handhabung jedoch eine Uhr mit einer Geschwindigkeitsanzeige verwenden. Die optische Anzeige liefert die Geschwindigkeitsdaten mit einer geringen Verzögerungsrate, dennoch konnte die Geschwindigkeitskonstanz und die Anpassung bei den Stufenübergängen deutlich verbessert werden.

Die Leistungstests wurden im Einzelverfahren gemeinsam mit den Probandinnen und Probanden auf der Laufbahn durchgeführt. Jeder Teilnehmer bzw. jede Teilnehmerin erhielt zur Testung eine vollständige Ausrüstung bestehend aus Smartphone, Brustgurt, Footpod, Smartphone-Hülle und Kopfhörer sowie einen Account auf der Website des MMA zur Speicherung der Datensätze. Zusätzlich wurde ein Anweisungsbogen mit den entsprechenden Instruktionen für die Test-Durchführung ausgehändigt.

Zur Durchführung der Testung wurden die Probandinnen und Probanden in der Handhabung der Ausrüstung geschult. Als erster Schritt musste der Footpod kalibriert werden.

Dabei war bereits die vollständige Ausrüstung zu tragen. Obwohl die Herzfrequenz bei der Fußsensor-Kalibrierung keine Rolle spielt, konnte so bereits die volle Funktionsfähigkeit des Systems überprüft oder diese anschließend durch Austausch fehlerhafter Sensoren hergestellt werden.

Der Fußsensorlauf wird über den MMA mittels der Option Footpod-Kalibrierungslauf gestartet. Die Kalibrierung des Fußsensors wurde gleichzeitig als Aufwärm- und zur Gewöhnung an die Startgeschwindigkeit im PerPot-Stufentest genutzt, da sich gezeigt hat, dass insbesondere die niedrigste Stufe bei vielen Teilnehmerinnen und Teilnehmern Schwierigkeiten verursachte. Dies war eine weitere Optimierung, die zur Verbesserung der Qualität der Läufe nach dem Gütemaß beigetragen hat. Es wurden 800 bzw. 1200 Meter zur Kalibrierung des Fußsensors absolviert. Dabei ergibt eine Runde auf der Innenbahn der Laufbahn genau 400 Meter und die Markierungen auf der Laufbahn können als Start- und Endpunkte genutzt werden. Die näherungsweise Ermittlung des Anpassungswertes über den Schrittzähler wurde in 3.3.2 erläutert.

Nach Abschluss der Fußsensor-Kalibrierung wird der Anpassungswert auf dem Server gespeichert und es kann der Stufentest gestartet werden. Es gibt 3 verschiedene Stufentests, abhängig vom Leistungsvermögen. L1 (6 km/h Startgeschwindigkeit) ist für den niedrigsten Leistungsstand, L2 (7 km/h) für ambitionierte Amateure und L3 (8 km/h) für Profis. Die Anfängervariante steigert alle 3 Minuten um 1 km/h, die Freizeitvariante um 1,5 km/h und die Profivariante um 2 km/h. Die korrekte Auswahl ist wichtig, damit die Probandinnen und Probanden die korrekte Anzahl an Stufen durchlaufen können. Es müssen mindestens 4 Stufen vollständig absolviert werden und ein Kalibrierungslauf sollte maximal 20 Minuten dauern. Die Auswahl des richtigen Laufs wurde individuell durchgeführt, basierend auf den Angaben der Probandinnen und Probanden über bisherige Laufzeiten. Nur einmal musste ein Kalibrierungslauf aufgrund einer falsch absolvierten Startgeschwindigkeit wiederholt werden. Das Abbruch-Kriterium des Steigerungslaufes ist eine Abweichung nach unten von mehr als 3 km/h für eine Mindestdauer von 3 Sekunden. Danach geht das System automatisch in den Auslaufmodus, bei dem nochmals die Startgeschwindigkeit für 3 Minuten gelaufen werden muss. Dieser Auslaufmodus wird automatisch durch die kontinuierliche Steigerung der Geschwindigkeit ausgelöst. Er kann aber auch manuell ausgelöst werden, etwa durch eine bewusste starke Geschwindigkeitsreduktion z.B. wenn ein Leistungseinbruch unmittelbar bevor steht.

Wurde der Kalibrierungslauf abgeschlossen, wird dieser anhand des Gütemaßes überprüft, die Daten werden auf dem Server gespeichert und die iANS simuliert. In einigen Fällen (ca. 20%) waren die Kalibrierungsdaten nach dem Gütemaß im Bereich von 3-4. In der Regel wurde dies durch eine zu ungleichmäßig gelaufene Startstufe oder Auslaufstufe ausgelöst, da diese niedrige Geschwindigkeit für die meisten Probanden nur schwer konstant zu halten war. Da hier aufgrund der niedrigen Geschwindigkeit keine Veränderung hinsichtlich der Leistungsdaten und Verzögerungsraten erwartet wird und die schnelleren Stufen in Ordnung waren, kann durch nachträgliche Kantenglättung der Geschwindigkeitsspitzen das Gütemaß verbessert werden. Dennoch ist diese Vorgangsweise mit Vorsicht zu betrachten.

Der in Abbildung 16 dargestellte Leistungstest beschreibt die Herzfrequenz-Geschwindigkeitsrelation von Proband P17. Die Herzfrequenz-Entwicklung und die iANS sind wesentlich für die Geschwindigkeitsempfehlung im PerPot-Lauf. Der Test wurde mit der Profistufe L3 gestartet und endete nach der 5. Stufe mit 16 km/h. Hier wurde somit die richtige Stufe gewählt, da sowohl die Minimalanzahl (4 Stufen) und auch die Maximalanzahl (8 Stufen) eingehalten wurde.

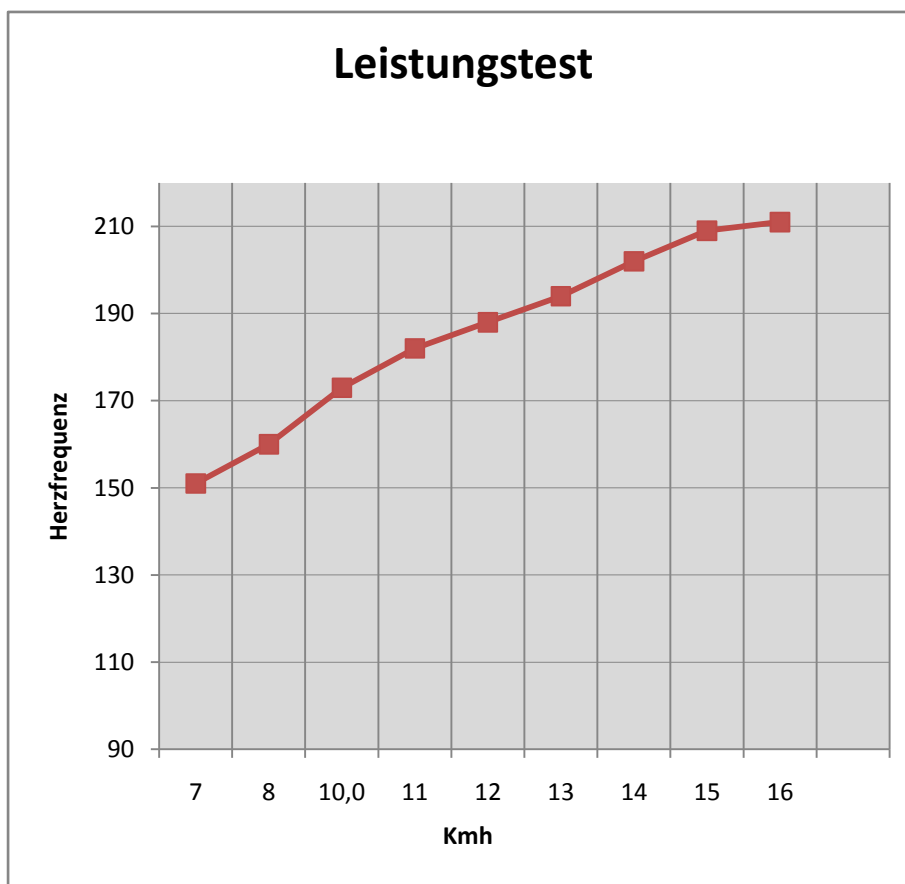


Abb. 16: Herzfrequenz-Verlauf des Kalibrierungslauf von P17

4.4 10-km-Läufe

Im Anschluss an den Leistungstest konnten nach frühestens 2 Tagen die 10-km-Läufe selbstständig absolviert werden. Die Reihenfolge wurde dabei randomisiert, um evaluieren zu können, ob diese Einfluss auf die Ergebnisse hat. Die Strecke musste bei beiden Läufen exakt die gleiche sein und die Probandinnen und Probanden wurden bei der Auswahl des Zeitpunktes der Läufe angewiesen, für größtmögliche Objektivität hinsichtlich der äußeren Einflüsse zu sorgen. Zwischen den Läufen musste für ausreichend Pause bzw. Erholung gesorgt werden, daher musste ein Abstand von 4 Tagen zwischen den zwei Läufen eingehalten werden. Nach Abschluss der Läufe wurden die Lauf-Sets retourniert und die Probandinnen und Probanden erhielten eine individuelle Auswertung ihre Läufe.

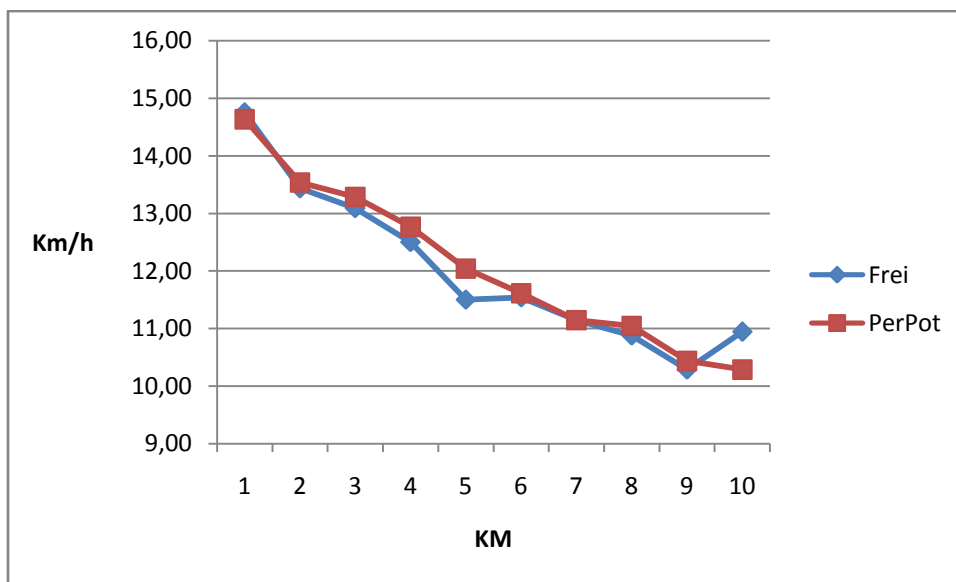


Abb. 17: Geschwindigkeitsverlauf von P17

4.4.1 Freier Lauf

Auch um einen freien Lauf durchführen zu können, ist es notwendig, die vollständige Ausrüstung anzulegen und eine Verbindung zum Server herzustellen. Die Probandinnen und Probanden wurden bereits im Vorfeld automatisch mit ihrem jeweiligen Account eingeloggt, um hier etwaigen Bedienungsfehlern vorzubeugen. Zur weiteren Vereinfachung wurden vordefinierte Läufe über die 10-km-Distanz angelegt. Über den Button *freier Lauf* kann der Test gestartet werden. Nach Bestätigung der vollen Funktionsfähigkeit der Peripherie sowie der Serververbindung wird die Probanden bzw. der Proband über den Start des Laufes informiert. Mit Überschreiten von mindestens 8 km/h beginnt die Zeit und Distanzmessung. Anschließend wird keinerlei Feedback, außer einer Information über die absolvierten Kilometer, übermittelt. Nach 10 km wird der Lauf gestoppt und die Probandin bzw. der Proband wird über die gelaufene Zeit informiert. Die Daten werden bei bestehender Serververbindung in Echtzeit am Server gespeichert und der MMA verlässt automatisch den Laufmodus.

4.4.2 PerPot-Lauf

Die Vorbereitungen für den PerPot-Lauf erfolgen analog zum freien Lauf. Die Probandin bzw. der Proband entscheidet sich im Menü des MMA für den Button PerPot-Lauf. Nach Überprüfung der Konnektivität der Peripherie kann gestartet werden. Zu Beginn wird die Probandin bzw. der Proband über den Start des Laufes informiert. Wie beim freien Lauf startet die Messung erst bei Überschreiten von mindestens 8 km/h. Die Startgeschwindigkeit wird vorgegeben und zu Beginn des Laufes genannt. Bei einer Abweichung von mehr als 0.3 km/h – schneller oder langsamer –, wird dies im 15 Sekunden Takt mitgeteilt. Während des Laufes kann es je nach tatsächlicher Performance der Probandin bzw. des Probanden zu Anpassungen bei der empfohlenen Geschwindigkeit und bei der errechneten Zielzeit kommen. Sind die 10 Km absolviert, wird der Lauf automatisch beendet.

4.5 Auswertung

4.5.1 Laufzeiten

Tab. 4: Ergebnisse und Vergleich PerPot mit freiem Lauf

Teilnehmer	Zeit Perpot	Zeit Frei	Differenz Absolut	Relative Differenz in %
P1	00:49:19	00:48:24	+ 00:00:55	+ 1,9%
P2	00:56:00	00:54:53	+ 00:01:07	+ 2,0%
P3	00:44:02	00:47:20	- 00:03:18	- 7,0%
P5	00:53:14	00:52:41	+ 00:00:33	+ 1,0%
P6	00:44:01	00:42:35	+ 00:01:26	+ 3,3%
P7	00:54:32	01:02:04	- 00:07:32	- 12,1%
P8	00:35:13	00:34:10	+ 00:01:03	+ 3,0%
P9	00:51:51	00:53:27	- 00:01:36	- 3,0%
P10	00:52:18	00:48:36	+ 00:03:42	+ 7,1%
P12	00:52:19	00:47:47	+ 00:04:32	+ 8,7%
P13	00:43:49	00:44:49	- 00:01:00	- 2,2%
P14	00:45:10	00:45:26	- 00:00:16	- 0,6%
P15	00:56:51	01:04:25	- 00:07:34	- 11,7%
P16	01:01:46	01:04:35	- 00:02:49	- 4,4%
P17	00:50:21	00:50:34	- 00:00:13	- 0,4%
P18	00:53:44	00:53:42	+ 00:00:02	+ 0,1%
P19	00:34:02	00:33:49	+ 00:00:13	+ 0,6%
P20	00:47:09	00:43:36	+ 00:03:33	+ 7,5%
P21	00:54:01	01:02:43	- 00:08:42	- 13,9%
P24	01:06:42	01:04:00	+ 00:02:42	+ 4,0%
P26	00:46:27	00:53:14	- 00:06:47	- 12,7%
P27	00:57:08	01:05:24	- 00:08:16	- 12,6%
P28	01:01:13	00:53:13	+ 00:08:00	+ 13,1%
P29	00:51:09	00:55:23	- 00:04:14	- 7,6%
P30	00:56:39	00:58:10	- 00:01:31	- 2,6%
P32	01:01:20	01:04:17	- 00:02:57	- 4,6%
$\bar{x}$	00:51:33	00:52:40	- 00:01:07	- 5,7%

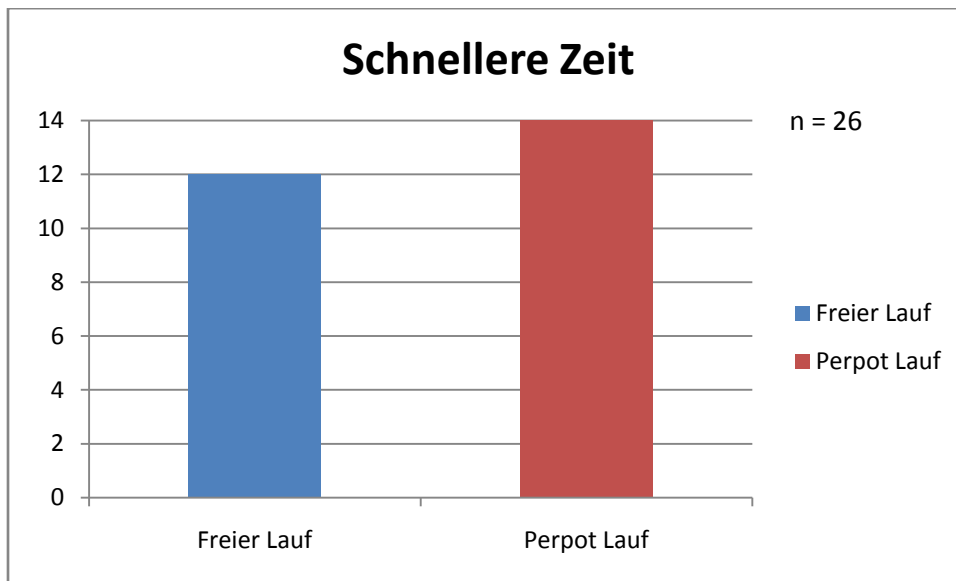


Abb. 18: Verteilung der schnelleren Laufzeiten

Die Auswertung der 10-km-Läufe enthält $n = 26$ verwertbare Datensätze. 8 Teilnehmerinnen und Teilnehmer konnten keine gültigen Datensätze liefern.

In Tabelle 4 wurden die Laufzeiten aller Probandinnen und Probanden gelistet und die relative sowie absolute Differenz der Laufzeiten errechnet. Es handelt sich um eine heterogene Gruppe, deren Laufzeiten normalverteilt sind. Vereinzelt konnten die Vorgaben von maximal 60 Min Laufzeit nicht eingehalten werden. Das PerPot-Modell kann aber auch für wesentlich längere Distanzen und vergleichsweise langsame Geschwindigkeiten verwendet werden, somit können diese Datensätze ebenfalls analysiert werden. In der Tabelle findet man neben der Auflistung der Laufzeiten die absolute und relative Darstellung der Zeitunterschiede. Die maximale Abweichung vom Mittelwert beträgt 13.1% bei den freien Läufen und 13.9% bei den PerPot-Läufen. Diese statistischen Ausreißer sind zwar selten, können aber vorkommen und decken sich mit Ergebnissen aus bisherigen Studien. (vgl. Endler, 2013, S. 88-89).

Abbildung 18 zeigt die Verteilung der schnelleren Zeiten auf die beiden Läufe. 12 mal war der freie Lauf schneller, 14 mal der PerPot-Lauf. Im direkten Vergleich zeigte sich ein Mittelwert des Zeitunterschiedes von 1 min 7 Sekunden Vorsprung der Perpot-Läufe gegenüber der freien Läufe, dies entspricht einem mittleren Unterschied von 5.7% zu Gunsten der PerPot-Läufe.

Tab. 5: T-Test bei gepaarten Stichproben mit SPSS

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paaren 1	Zeit_PerPot	0:51:33	26	0:07:43	0:01:30
	Zeit_Frei	0:52:39	26	0:09:00	0:01:45

Korrelationen bei gepaarten Stichproben

		N	Korrelation	Signifikanz
Paaren 1	Zeit_PerPot & Zeit_Frei	26	,883	,000

Gepaarte Differenzen					T	df	Sig. (2-seitig)
Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
			Untere	Obere			
-0:01:06	0:04:13	0:00:49	-0:02:49	0:00:35	-1,343	25	,191

Der hohe positive Korrelationsfaktor von 0,883 in Tab. 5 beschreibt den Zusammenhang der ersten und zweiten Stichprobe. Eine hohe erste Laufzeit lässt auf eine hohe zweite Laufzeit schließen, ebenso ist bei einer schnellen ersten Zeit eine schnelle zweite Zeit zu erwarten. Dies ist auch durchaus nachvollziehbar bei Laufstudien, da das Steigerungspotential innerhalb von 2 Läufen nicht unendlich groß ist und die Unterschiede bei der Tagesverfassung über die Anzahl der Teilnehmer ausgeglichen werden.

Bei einer statistischen Analyse mit Hilfe des T-Tests abhängiger Stichproben konnte kein signifikanter Unterschied (Bedingung Sig. zweiseitig > 0.05) hinsichtlich der Laufzeiten bei freien Läufen und Perpot-Läufen festgestellt werden. Die Teilung der Datensätze in Gruppen <50 min sowie >50 min brachte vergleichbare Ergebnisse. Somit kann festgehalten werden, dass zwar ein Zeitvorsprung der PerPot-Läufe von 54 Sekunden bzw. 5.7% erzielt wurde, dieser jedoch statistisch gesehen nicht signifikant ist. Dies bestätigt das knappe Ergebnis bei den Laufbestzeiten von 12 zu 14 Laufsiegen.

4.5.2 Vergleich unter Berücksichtigung der Reihenfolge der Läufe

Dieser Untersuchungspunkt ist deswegen von Bedeutung, da in bisherigen Studien die Reihenfolge der Läufe nicht berücksichtigt wurde und der PerPot-Lauf immer als 2. Lauf gewählt wurde. Ein Einfluss durch die Reihenfolge der Läufe wird vermutet. Insbesondere bei Läuferinnen und Läufern, die nicht regelmäßig 10-km-Läufe absolvieren, fehlt die Erfahrung bezüglich der Laufdistanz. Hier kann das Wissen um sein eigenes Leistungspotential und die Erfahrung einen großen Unterschied machen. Daher wurden die Probandinnen und Probanden in zwei Gruppen mit jeweils unterschiedlicher Laufreihenfolge eingeteilt. Die Verteilung erfolgte beliebig durch Randomisierung.

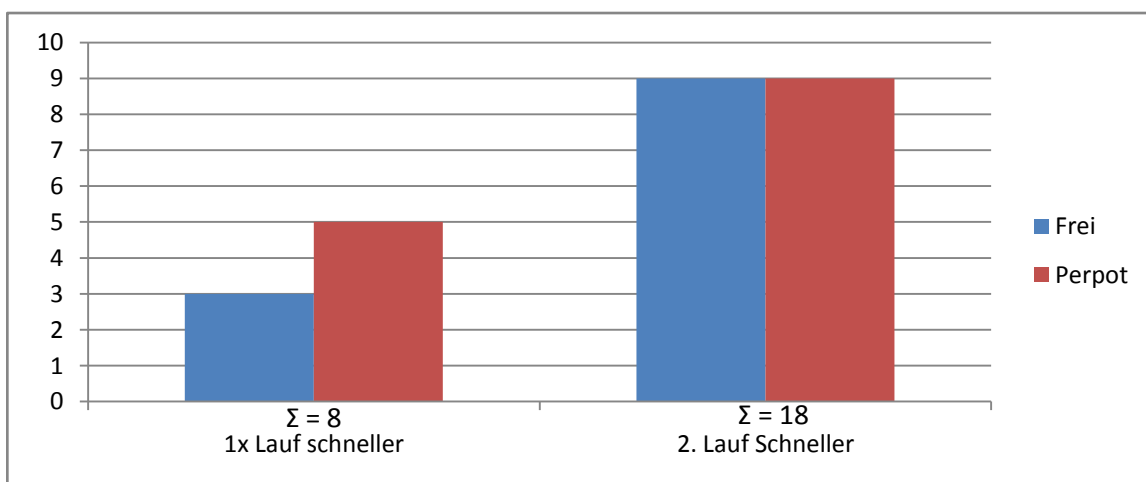


Abb. 19: Laufbestzeiten unter Berücksichtigung der Reihenfolge

Das Balkendiagramm in Abbildung 19 zeigt mit 8 zu 18 Läufen eine eindeutige Tendenz, dass der 2. Lauf der schnellere ist. Aus dieser Statistik lässt sich bereits interpretieren, dass die Reihenfolge der Läufe einen großen Einfluss auf das Ergebnis hat.

Tab. 6: Zeitdifferenzen unter Berücksichtigung der Reihenfolge der Läufe

$\bar{x}$	Differenz Frei schneller	Differenz Perpot schneller	Vorsprung Perpot
1. Lauf	00:00:34	00:02:52	00:02:18
2. Lauf	00:02:54	00:04:43	00:01:49
Vorsprung 2. Lauf	00:02:20	00:01:51	

In Tabelle 6 sind die durchschnittlichen Zeitvorsprünge in 4 Fällen dargestellt. Diese drücken den Zeitvorsprung im Mittel aus, wenn der jeweilige Lauf der schnellere war. Es bestätigt sich der zuvor ermittelte generelle Vorsprung des 2. Laufes gegenüber den Zeiten

des 1. Laufes, wobei die PerPot-Läufe sowohl im 1. Lauf als auch im 2. Lauf deutlich mehr Vorsprung haben, wenn sie schneller sind, als freie Läufe im gleichen Fall.

Unter der Annahme, dass die Reihenfolge der Läufe einen möglichen Effekt des PerPots verdeckt – insbesondere wenn der PerPot-Lauf zuerst durchgeführt wird – wurden die Läufe in 2 Gruppen eingeteilt, nach Reihenfolge der Läufe nochmals auf Signifikanz getestet.

Tab. 7: T-Test bei gepaarten Stichproben, Reihenfolge Perpot/Frei

N	Gepaarte Differenzen					T	df	Sig. (2-seitig)
	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler	95% Konfidenzintervall				
				Untere	Obere			
14	0:00:50	0:03:41	0:00:59	-0:01:17	0:02:58	,852	13	,410

Tab. 8: T-Test bei gepaarten Stichproben, Reihenfolge Frei/PerPot

N	Gepaarte Differenzen					T	df	Sig. (2-seitig)
	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler	95% Konfidenzintervall				
				Untere	Obere			
12	-0:03:23	0:03:44	0:01:04	-0:05:46	-0:01:01	-3,149	11	,009

Die Normalverteilung wurde mittels K-S-Test und grafischer Darstellung überprüft.

Wie in Tabelle 7 zu sehen ist, gibt es keinen signifikanten Unterschied ($0,410 > 0,05$) der Läufe, wenn die Reihenfolge Perpot/Frei ist. Bei der Reihenfolge Frei/PerPot konnte jedoch ein signifikanter Unterschied ($0,009 < 0,05$) festgestellt werden. In Tabelle 4 konnte bereits gezeigt werden, dass die PerPot-Zeiten im Mittel um 5.7% schneller sind als die freien Zeiten.

4.5.3 Abweichung Perpot-Vorhersage

Tab. 9: Relative Abweichung PerPot-Lauf und PerPot-Vorhersage

TN-Nummer	Zeit Perpot	Prognostizierte Zeit	Relative Abweichung
P1	00:49:19	00:46:10	+ 6,4%
P2	00:56:00	00:50:30	+ 9,8%
P3	00:44:02	00:43:10	+ 2,0%
P5	00:53:14	00:48:50	+ 8,3%
P6	00:44:01	00:41:10	+ 6,5%
P7	00:54:32	00:53:10	+ 2,5%
P8	00:35:13	00:35:10	+ 0,1%
P9	00:51:51	00:50:30	+ 2,6%
P10	00:52:18	00:45:30	+ 13,0%
P12	00:52:19	00:57:10	-9,3%
P13	00:43:49	00:46:10	-5,4%
P14	00:45:10	00:42:20	+ 6,3%
P15	00:56:51	00:53:10	+ 6,5%
P16	01:01:46	00:56:40	+ 8,3%
P17	00:50:21	00:45:50	+ 9,0%
P18	00:53:44	00:54:00	-0,5%
P19	00:34:02	00:34:23	-1,0%
P20	00:47:09	00:44:50	+ 4,9%
P21	00:54:01	00:51:40	+ 4,4%
P24	01:06:42	00:56:40	+ 15,0%
P26	00:46:27	00:44:50	+ 3,5%
P27	00:57:08	00:55:30	+ 2,9%
P28	01:01:13	01:03:50	-4,3%
P29	00:51:09	00:51:20	-0,4%
P30	00:56:39	00:56:40	+ 0,0%
P32	01:01:20	00:58:20	+ 4,9%
		$\bar{x}$	+ 3,7%
		$\bar{x}$ absolut	+ 5,8%

Die PerPot-Läufe sind darauf ausgelegt, dass die Probandinnen und Probanden die Vorgaben des PerPot-Feedbacks perfekt einhalten und die Reserve am Ende eines Laufes genau Null ist. Bei einem idealen Verlauf stimmt die Prognose mit der am Ende erzielten Leistung überein. Ein Unterbieten der Zeit ist aus diesem Grund nicht zwingend erforderlich. Da jedoch die letzte Minute im Lauf nicht berücksichtigt wird, um einen Zielsprint zu simulieren, kann die Zeit dennoch unterboten werden. Eine höhere Differenz kann z.B. durch eine gute Tagesform oder eine schlechte Kalibrierung begründet werden. Eine deutlich langsamere Zeit kann sich durch Nicht-Einhalten der PerPot-Vorgaben begründen. Wird z.B. für eine gewisse Zeit über der iANS gelaufen, verursacht dies einen Überlauf, der später mit einer niedrigeren Geschwindigkeit korrigiert werden muss.

Tabelle 9 listet die PerPot-Vorhersage basierend auf der individuellen Kalibrierung der Probandinnen und Probanden. 6 mal wurde die Perpot-Zeit unterboten, wobei die Spannweite -9.3% bis + 15 % beträgt.

Tab. 10: Korrelations-Test nach Pearson

	Mittelwert	Standardabweichung	N
Zeit_PerPot	0:51:33	0:07:43	26
Prognostizierte_PerPot_Zeit	0:49:31	0:07:09	26

Korrelationen

		Zeit_PerPot	Prognostizierte_PerPot_Zeit
Zeit_PerPot	Korrelation nach Pearson	1	,916**
	Signifikanz (2-seitig)		,000
	N	26	26
Prognostizierte_PerPot_Zeit	Korrelation nach Pearson	,916**	1
	Signifikanz (2-seitig)	,000	
	N	26	26

Die Zeit lag im Mittel 2 min und 14 sec über der prognostizierten Zeit. Wie der Korrelationstest nach Pearson in Tabelle 10 zeigt, ist der Zusammenhang der prognostizierten Zeit und der tatsächlich erzielten Zeit mit $r=0,916$ sehr hoch.

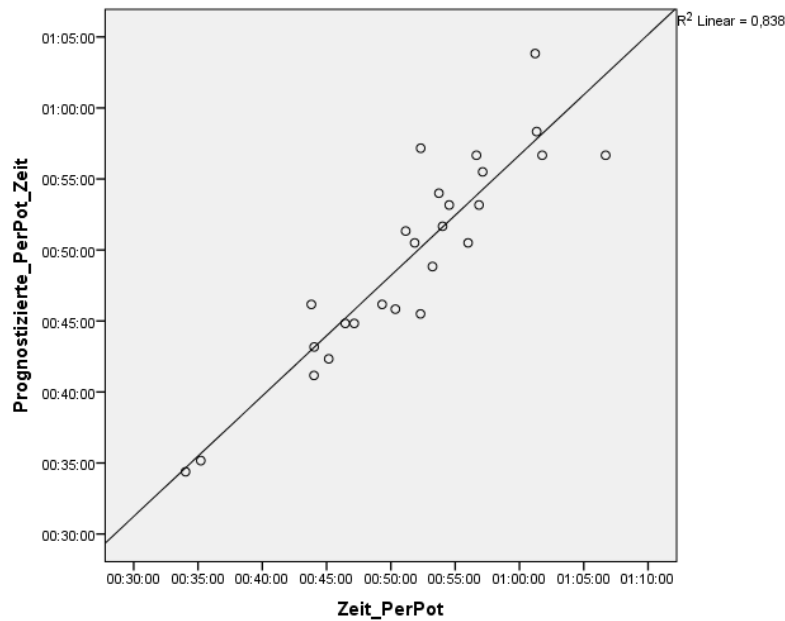


Abb. 20: Darstellung der Korrelation im Punkt-Strich-Diagramm

Das Punkt-Strich-Diagramm in Abbildung 20 zeigt eine starke positive Korrelation. Eine niedrige prognostizierte Perpot-Zeit lässt eine niedrige PerPot-Zeit erwarten, eine prognostizierte hohe Endzeit lässt auf eine tatsächlich hohe Endzeit schließen. Die Trendlinie zeigt, dass die prognostizierten Endzeiten im Mittel schneller waren als die tatsächlich erreichten PerPot-Zeiten. Die dichte Streuung der Werte um die Trendlinie beschreibt den Korrelationswert grafisch. Nur vereinzelt gibt es größere Abweichungen.

4.5.4 Zuverlässigkeit der Zielzeit-Prognosen verglichen mit der Endzeit

Die zuvor erwähnte Korrelation kann mit den adaptierten Zielzeiten erweitert werden, die während des PerPot-Laufes prognostiziert werden. Dadurch kann die zweite Forschungsfrage über die Zuverlässigkeit der Zielzeit-Prognosen, die das System berechnet, im Bezug auf die tatsächlich gelaufene Endzeit beantwortet werden.

Das PerPot-Modell ist so aufgebaut, dass während des Laufes die Zielzeiten zuerst nach 1 Minute und dann in regelmäßigen 5 Minuten-Intervallen angepasst werden. Insbesondere zu Beginn eines Laufes können aufgrund der abweichenden Wetterbedingungen bzw. Tagesform im Vergleich zur Ausgangssimulation größere Abweichungen in der Modellierung entstehen.

In Tabelle 9 wurden die prognostizierten Zeiten zum Start und während des Wettkampfes mit der tatsächlich erreichten Zielzeit verglichen. Die Start-Vorhersagen lagen im Schnitt um 3,7% unter den tatsächlich erreichten Endzeiten. Nach 11 min wichen die Startvorhersagen im Mittel um 8,2% ab, wobei alle Prognosen schnellere Zeiten lieferten als die tatsächlich erreichte Endzeit. Im weiteren Verlauf näherten sich diese Zeiten an, sodass nach 31 Minuten nur mehr ein Unterschied von 2,9% zwischen prognostizierter Zeit und erreichter Zielzeit lag. Im weiteren Verlauf näherten sich diese Werte weiter an und 6 Probanden gelang es, die prognostizierte Endzeit zu unterbieten.

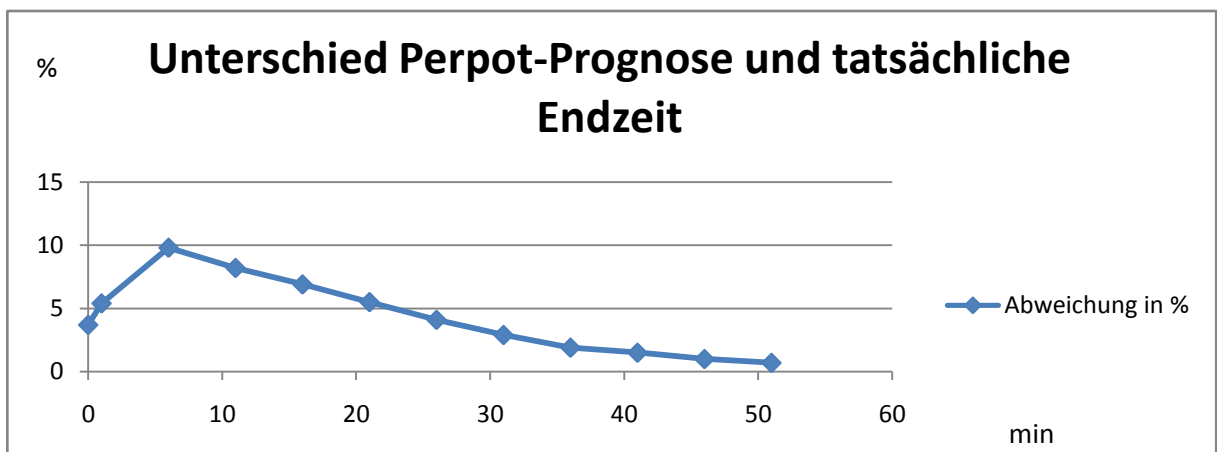


Abb. 21: Verlauf Abweichung in % zwischen prognostizierter und tatsächlicher Endzeit

Zur Beantwortung der Forschungsfrage kann festgehalten werden, dass die prognostizierten Zeiten mit den tatsächlich erreichten Endzeiten bereits am Start sehr gut sind. Zu Beginn des Laufes herrschen teilweise große Unterschiede zwischen Prognose und tatsächlich erreichter Zeit, wobei das System dazu tendiert, schnellere Zeiten vorher zu sagen, als dann tatsächlich erreicht werden. Insbesondere veränderte Wetterbedingungen können den Un-

terschied zwischen Startprognose und Zielzeit beeinflussen. Bei einem 10-km-Lauf können aber spätestens nach 30 Minuten mit einer Abweichung von weniger als 3% sehr gute Prognosen über die Endzeit gemacht werden. Eine Möglichkeit, die Prognosen näher an die tatsächlich erreichten Zeiten anzupassen, wäre z.B. Trainingsläufe in die Kalibrierung mit einzubeziehen. Dadurch kann das tatsächliche Leistungspotential der Athletinnen und Athleten besser erfasst werden.

Tab. 11: Vergleich PerPot-Zeit und Prognosen

Teilnehmer	Zeit Perpot	Prognostizierte Zeit	Abweichung Start	Prog. Zeit 11 min	Abweichung 11 Min	Prog. Zeit 31 Min	Abweichung 31 Min
P1	00:49:19	00:46:10	6,4%	00:45:21	8,0%	00:47:17	4,1%
P2	00:56:00	00:50:30	9,8%	00:52:06	7,0%	00:54:20	3,0%
P3	00:44:02	00:43:10	2,0%	00:40:05	9,0%	00:43:04	2,2%
P5	00:53:14	00:48:50	8,3%	00:48:02	9,8%	00:51:22	3,5%
P6	00:44:01	00:41:10	6,5%	00:41:25	5,9%	00:43:43	0,7%
P7	00:54:32	00:53:10	2,5%	00:52:39	3,5%	00:53:45	1,4%
P8	00:35:13	00:35:10	0,1%	00:34:20	2,5%	00:35:15	-0,1%
P9	00:51:51	00:50:30	2,6%	00:46:44	9,9%	00:49:20	4,9%
P10	00:52:18	00:45:30	13,0%	00:48:35	7,1%	00:52:00	0,6%
P12	00:52:19	00:57:10	-9,3%	00:48:44	6,8%	00:51:12	2,1%
P13	00:43:49	00:46:10	-5,4%	00:41:51	4,5%	00:43:41	0,3%
P14	00:45:10	00:42:20	6,3%	00:44:09	2,3%	00:44:48	0,8%
P15	00:56:51	00:53:10	6,5%	00:50:54	10,5%	00:55:17	2,8%
P16	01:01:46	00:56:40	8,3%	00:52:40	14,7%	00:57:22	7,1%
P17	00:50:21	00:45:50	9,0%	00:42:50	14,9%	00:46:38	7,4%
P18	00:53:44	00:54:00	-0,5%	00:48:59	8,8%	00:52:13	2,8%
P19	00:34:02	00:34:23	-1,0%	Keine Daten	Keine Daten	Keine Daten	Keine Daten
P20	00:47:09	00:44:50	4,9%	00:43:18	8,2%	00:45:43	3,0%
P21	00:54:01	00:51:40	4,4%	00:49:15	8,8%	00:52:29	2,8%
P24	01:06:42	00:56:40	15,0%	00:57:03	14,5%	01:00:15	9,7%
P26	00:46:27	00:44:50	3,5%	00:40:39	12,5%	00:45:42	1,6%
P27	00:57:08	00:55:30	2,9%	00:52:50	7,5%	00:55:08	3,5%
P28	01:01:13	01:03:50	-4,3%	00:58:04	5,1%	01:00:25	1,3%
P29	00:51:09	00:51:20	-0,4%	00:48:33	5,1%	00:50:33	1,2%
P30	00:56:39	00:56:40	0,0%	00:53:36	5,4%	00:55:21	2,3%
P32	01:01:20	00:58:20	4,9%	00:53:25	12,9%	00:59:57	2,3%
$\bar{x}$	00:51:33	00:49:31	3,7%	00:47:51	8,2%	00:50:40	2,9%

4.6 Diskussion der Daten

4.6.1 Objektivität der Daten und äußere Einflüsse

Die Probandinnen und Probanden wurden zu Beginn der Studie über die Rahmenbedingungen der 10-km-Läufe informiert. Die Ideal-Situation wäre eine Durchführung der Läufe innerhalb von 6-8 Tagen. Am ersten Tag wird der betreute Kalibrierungslauf durchgeführt, am 3. Tag der erste 10-km-Lauf und am 7. oder 8. Tag der zweite 10-km-Lauf. Alle Läufe werden bei konstanten Temperaturen und Wetterverhältnissen durchgeführt. Endler (2013, S. 58) weist in diesem Zusammenhang auf den Einfluss von Temperaturunterschieden bzw. Tagesform auf das PerPot-Modell hin und die Einflussstärke der Umgebungsfaktoren wurde in Kapitel 2.1.7 beschrieben. Durch die Live-Datenanalyse mittels MMA, wie sie in dieser Studie verwendet wurde, kann das System jedoch auf Unterschiede zwischen Kalibrierungslauf und PerPot-Lauf reagieren, daher ist dieser Punkt zu vernachlässigen, solange gewährleistet ist, dass bei den beiden 10-km-Läufen gleiche Bedingungen herrschen. Im Rahmen der Studie wurden die GPS-Daten der Läufe auf dem Server gespeichert und anhand der Geo-Daten können Rückschlüsse über die Wetterbedingungen bei den Läufen gezogen werden. Die Probanden hielten sich durch sorgfältige Auswahl der Laufzeitpunkte an die Vorgaben. In einzelnen Fällen gab es jedoch leichte Abweichungen, da bedingt durch die äußeren Veränderungen gleiche Bedingungen oft längere Zeit nicht vorherrschten. Dies ist ein Schwachpunkt der Studie, da hier eine Interpretation über den Grad des Einflusses ähnlich unseriös wäre, wie zu versuchen den Einfluss der Tagesform zu interpretieren. Mittels einer Indoor-Untersuchung z.B. auf einer Indoor-Laufbahn könnte man die äußeren Rahmenbedingungen konstanter halten, um so eine noch bessere Aussagekraft der Daten zu erreichen. Zusätzlich hilft eine hohe Anzahl an Teilnehmerinnen und Teilnehmern, einen möglichen Einfluss von Anwendungsfehlern abzufedern.

Eine weitere Bedingung war eine ebene Laufstrecke, da das PerPot-Modell Steigungen oder Gefälle nicht berücksichtigt. Es wurde empfohlen zweimal exakt die gleiche Strecke zu laufen. Mittels GPS-Daten konnten die ausgewählten Laufstrecken überprüft werden. Es wurden in zwei Fällen Abweichungen bei den Strecken gefunden. Die betreffenden Probandinnen bzw. Probanden erklärten dies mit einem vorübergehenden Umzug bedingt durch das Semesterende an der Universität. Da sowohl Original- als auch Vergleichsstrecke ein ebenes Streckenprofil aufwiesen, konnte dieser Punkt vernachlässigt werden. Die Daten von P19 wurden mit der Distanz von 7.5 Kilometer verglichen, da trotz Wiederho-

lung der Läufe ab ca. 7.6 km aufgrund von Systemfehlern keine Daten mehr erfasst wurden.

Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer sollten ihre 10-km-Läufe im Abstand von mindestens 4 Tagen und maximal 14 Tagen absolvieren. Dies konnte von fast allen Probandinnen und Probanden eingehalten werden. P2 und P10 benötigten aufgrund technischer Probleme mit dem System jedoch 30 Tage für die Läufe und P26 machte keinen Tag Pause zwischen den Läufen. Als Grund nannte P26, dass er jeden Tag Läufe im Umfang von ca. 10 km absolviert und somit vor dem ersten Lauf die gleiche körperliche Ausgangssituation bestand wie danach. Die statistischen Auswertungen wurden auch ohne diese 3 Datensätze durchgeführt und ergaben keinen Unterschied hinsichtlich der Signifikanz des Untersuchungsergebnisses.

4.6.2 Technische Einflussfaktoren

Das in dieser Studie verwendete Verfahren zur Kalibrierung des Fußsensors hat in Nachuntersuchungen Ungenauigkeiten bei der Distanzmessung bestätigt. Die Kalibrierungsläufe wurden auf genormten 400 Meter-Laufbahnen absolviert und die Kalibrierungswerte für jede Athletin und jeden Athleten individuell ermittelt. Dennoch wich die Distanzmessung um ein paar Meter von der tatsächlich absolvierten Distanz ab. Dies zeigte sich während der PerPot-Kalibrierungsläufe über die Anzahl der Runden auf der Laufbahn und die theoretische und tatsächlich auf dem Server gespeicherte Distanz. Eine Wiederholung der Fußsensor-Kalibrierung brachte keine bessere Übereinstimmung. Da die Abweichung am Ende eines Laufes nur einige Meter beträgt, und jeder Lauf mit den selben Fußsensor-Kalibrierungen absolviert wird, wird kein Einfluss auf das Studienergebnis angenommen.

Die von der Universität Wien zur Verfügung gestellten Geräte (Footpod, Brustgurt, Smartphone, Smartphone-Tasche) wurden vor der Ausgabe überprüft und gewartet. Defekte Geräte wurden ausgetauscht. Dennoch kam es sowohl während der Kalibrierungsläufe als auch bei den 10-km-Läufen zu Ausfällen. Die Ausfälle während der Kalibrierungsläufe wurden vor Ort behoben. Die Ausfälle während der 10-km-Läufe führten jedoch dazu, dass einige Probanden ihre Läufe nicht starten konnten, oder das System während des Laufes ausgefallen ist. Im vorherigen Kapitel wurde erwähnt, dass zwei Probandinnen und Probanden 30 Tage benötigten um ihre Läufe abzuschließen. In beiden Fällen wurden mehrmals Läufe aufgrund technischer Probleme automatisch abgebrochen. In weiteren Fällen stiegen die Teilnehmerinnen und Teilnehmer ganz aus der Studie aus, sodass sich die Stu-

die verzögert hat und weitere Probandinnen und Probanden gefunden werden mussten. Bei defekten Geräten wurde ein Austausch oder Batteriewechsel durchgeführt, jedoch gab es auch Ausfälle des Systems, die weder auf defekte Hardware noch auf Software-Probleme zurück zu führen waren.

Im Rahmen der Vortestung des MMA wurden einige Software-Optimierungen durchgeführt. Die Empfehlung, das Smartphone beim Kalibrierungslauf in der Hand zu halten, um die Geschwindigkeitsanzeige sehen zu können, führte zwar zu wesentlich gleichmäßigeren Kalibrierungsläufen, jedoch wurde dadurch oft unabsichtlich die Touch-Funktion der Applikation ausgeführt und Läufe beendet. Daraufhin wurde die Touch-Funktion angepasst, sodass man bewusst länger drücken musste, um in das Menü zu kommen und um versehentliches Beenden der Applikation zu verhindern. Dies und eine Optimierung der Helligkeit der Display-Anzeigen wurde noch vor Start der Untersuchung durchgeführt. Dennoch berichteten Probandinnen und Probanden weiter von Ausfällen, die vom Server aus nicht nachvollzogen werden konnten. Erst nach einigen Vor-Ort Begleitungen der 10-km-Läufe konnte die Ursache hierfür entdeckt werden. Nicht alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer konnten das Handy in die Armtasche geben, da ihre Arme schlichtweg zu klein waren und die Taschen nicht ordnungsgemäß befestigt werden konnten. Insbesondere, wenn das Handy in der Hand gehalten wurde oder sich in der Hosentasche befand, wurde die Touch-Funktion trotz Anpassung ausgelöst und beendete in manchen Fällen die Läufe. Da die meisten Handys bereits ausgegeben wurden, wurde auf ein Software-Update verzichtet und stattdessen die Probandinnen und Probanden auf das Thema sensibilisiert bzw. empfohlen die Sperrfunktion des Smartphones zu aktivieren. Die Audiofunktion ist auch bei aktiver Tastensperre funktionsfähig. Für zukünftige Laufstudien wird empfohlen, die Touch-Funktion für die Dauer der Studie zu deaktivieren, da bei gesperrtem Handy keine optischen Anzeigen funktionieren und nicht überprüft werden kann, ob das System noch ordnungsgemäß funktioniert.

4.7 Fazit

Die Ergebnisse der Versuchsgruppe belegen die Konkurrenzfähigkeit des Mobile Motion Advisors. Es konnten im Mittel eine um 1 min und 7 Sekunden bzw. 5.7% schnellere Zeiten im PerPot-Lauf als im Vergleichslauf erzielt werden. Das Ergebnis von 14 schnelleren Zeiten mittels PerPot-Lauf und 12 schnelleren Zeiten mittels freiem Lauf fiel nicht eindeutig aus. Der T-Test bei verbundenen Stichproben weist ein Signifikanzniveau von $p=0,191$ unter Berücksichtigung der Zeiten aller Probandinnen und Probanden aus, womit kein signifikanter Unterschied angenommen werden kann. Die Teilung der Versuchsgruppe nach Leistungsfähigkeit –wobei eine Zeit unter 50 min als Grenze festgelegt wurde – brachte ebenfalls keinen erkennbaren Unterschied.

Es konnte jedoch gezeigt werden, dass die Reihenfolge der Läufe Einfluss auf das Ergebnis hat, wobei die PerPot-Zeiten im Durchschnitt sowohl im ersten Lauf als auch im zweiten Lauf schneller waren. Wenn die Reihenfolge Freier Lauf/PerPot-Lauf war. In diesem Fall konnte ein signifikanter Unterschied zu Gunsten der PerPot-Läufe festgestellt werden, wohingegen bei der umgekehrten Reihenfolge kein signifikanter Unterschied messbar war. Ein Einfluss der Laufreihenfolge auf das Gesamtergebnis der Studie wird daher vermutet. Zur Feststellung der Einflussstärke bedarf es jedoch weiterer Studien mit angepasstem Untersuchungsdesign.

Bei dem Vergleich der prognostizierten Startzeiten und der tatsächlich erreichten Endzeit konnte ein hoher Korrelationswert von 0,916 gemessen werden. Das Streu-Punkt-Diagramm in Abbildung 20 bestätigt diesen Zusammenhang, womit die Vorhersagefähigkeit des Leistungspotentials mit dem PerPot-Modell unterstrichen wird. Insgesamt lagen die erreichten Zielzeiten über den errechneten Startprognosen. Aufgrund des niedrigen Unterschiedes von 3.7% zu Beginn, kann angenommen werden, dass die Unterschiede der Bedingungen nicht sehr groß gewesen sind. Die Zielzeit-Prognosen während der PerPot-Läufe wichen nach Beginn der Läufe in den ersten Prognosen stark von der tatsächlich erreichten Zeit ab. Dies ist vor allem den Anpassungen an die äußeren Bedingungen zu zuschreiben. Die Prognosen lieferten dabei vor allem zu Beginn zu niedrige Zielzeiten. Im weiteren Verlauf näherten sich die Zeiten an, sodass ab Minute 30 die Zielzeit mit einer Abweichung von weniger als 3% prognostiziert werden konnte. Eine weitere Möglichkeit, den Verlauf der Prognosen zu optimieren, ist den Datenpool des Probanden zu erhöhen. Z.B. können die Trainingsläufe mit in die Berechnung einbezogen werden.

Es wurde bereits im Studiendesign berücksichtigt, den Einfluss äußerer Bedingungen auf das Studienergebnis zu vermeiden. Dennoch gelang dies den Teilnehmerinnen und Teilnehmern nicht immer perfekt. Einige Probandinnen und Probanden konnten den Zeitraum, in dem die Läufe zu absolvieren waren, nicht einhalten. Dies ist vor allem den in Kapitel 4.6.2 behandelten technischen Einflussfaktoren geschuldet. Auch Anwendungsfehler seitens der Probanden können trotz ausführlicher Einschulung nicht ausgeschlossen werden. Sie beeinflussten den Studienablauf insofern, dass Läufe abgebrochen wurden und sich die Durchführung verzögerte. Manche Probanden brachen danach die Studie ganz ab und es mussten neue Probanden gesucht werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine Studie zur Validierung der Wirksamkeit des Mobile Coaching Systems Mobile Motion Advisor präsentiert. Im ersten Teil der Arbeit wird das Prinzip des Mobile Coaching erläutert. Die Bedeutung und Möglichkeiten, Athletinnen und Athleten zu unterstützen, nimmt mit der Entwicklung modernster Sensoren zu und findet insbesondere im Laufsport bereits praktische Anwendung. Um die Funktionsweise des PerPot-Systems, das dem MMA zu Grunde liegt, zu beschreiben, wurden die Energiebereitstellungsprozesse, die beim Ausdauertraining auftreten, erläutert. Die Leistungsdiagnostik mittels Laktatstufentest und maxLass-Test zur Berechnung der individuellen aneroben Schwelle schließt den ersten Teil der Theorie ab. Um die Echtzeit-Optimierung mittels MMA nutzen zu können, muss ein Leistungsdiagnostik-Modell in den MMA integriert werden. Das PerPot-Modell übernimmt diese Aufgabe und wurde in diesem Kapitel ebenfalls detailliert beschrieben. Wir erfuhren, dass das System mittels Leistungstest die Leistungsfähigkeit von Athletinnen und Athleten messen und für bestimmte Distanzen modellieren kann. Im folgenden Kapitel wurde die Funktionsweise des Mobile Motion Advisor beschrieben. Der Aufbau des Systems zeigte, wie der MMA genutzt werden kann, um die Leistungsfähigkeit zu verbessern. Durch die Möglichkeit der Echtzeit-Optimierung während Trainingsläufen bzw. Wettkämpfen unterscheidet sich das System des MMA wesentlich von allen bisher gängigen Lauf-Applikationen. Durch die Live-Datenspeicherung des MMA kann so während eines Wettkampfes eine ständig angepasste Laufempfehlung gegeben werden. Im letzten Kapitel wurde das Studiendesign vorgestellt, das einen Kalibrierungslauf und zwei randomisierte 10-km-Läufe beinhaltet. Es wurde hervorgehoben, dass dies die erste Studie ist, bei der auch die Kalibrierung mittels MMA unter realen Bedingungen durchgeführt wurde. Somit konnte bewiesen werden, dass das System ohne weitere Anpassungen im Laufsport eingesetzt werden kann. Anschließend findet man die Auswertung der Datensätze. Es zeigte sich, dass das System bei der Prognose von Zielzeiten konkurrenzfähig ist. Die PerPot-Läufe waren im Durchschnitt schneller als die Vergleichsläufe, der Unterschied war jedoch nicht eindeutig und von der Reihenfolge der Läufe abhängig. Somit konnte die erste Forschungsfrage, ob mit dem System eine Leistungssteigerung erzielt werden kann, nur bedingt beantwortet werden. Der zweite Teil der Auswertung widmet sich der Frage, ob und wie gut das System Zielzeiten während des Wettkampfes prognostiziert. Es zeigte sich, dass sich das System gut zur Vorhersage eignet und sich

relativ schnell an äußere Umstände anpasst. Abschließend wurden die Studienergebnisse kritisch betrachtet und mögliche Schwachpunkte diskutiert.

Die Studiauswertung ergibt weiteren Forschungsbedarf zur Klärung der Forschungsfragen. So zeigte sich, dass der relativ komplizierte technische Ablauf trotz Optimierungen im Rahmen der Studie zu Schwierigkeiten und Anwendungsfehlern führen kann. Bei einer Studie, bei der Probandinnen und Probanden mehrere Läufe absolvieren, könnten mehr Datensätze pro Person produziert werden, ohne die Probandinnen und Probanden immer wieder neu auf die Handhabung des Systems einschulen zu müssen. So reduzieren sich die durch Anwendungsfehler verursachten Extremwerte. Durch Wiederholung der Läufe könnte außerdem der Einfluss der Reihenfolge näher beleuchtet werden. Eine weitere Anpassungsmöglichkeit wäre es, die Läufe in einem konstanten Umfeld, etwa einer Halle durchzuführen. Dies wäre eine zusätzliche Verbesserung hinsichtlich Objektivität gegenüber äußerer Einflüsse.

6 Literaturverzeichnis

- Baca, A., Kornfeind, P., Preuschl, E., Bichler, S., Tampier, M. & Novatchkov, H. (2010). A Server-Based Mobile Coaching System. *Sensors* 2010, 12, p. 10640-10662.
- Baca, A., Kornfeind, P. & Tampier, M. (2013). *The Mobile Motion Advisor - An Intelligent Real-time Feedback System*. Vortrag bei icSports 2013, Vilamoura/Portugal.
- Endler, S., (2013). *Anpassungen des Metamodells Perpot an den ausdauerorientierten Laufsport zur Trainings- und Wettkampfoptimierung*. Dissertation, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, Mainz.
- Endler, S. (2017). PerPot-Stufentest-Anleitung. Zugriff am 15. Januar 2017 unter http://perpot.de/index.php/stufentest_anleitung
- Janssen, P. G. J. M. (2003). *Ausdauertraining. Trainingssteuerung über die Herzfrequenz- und Milchsäurebestimmung*. (3. überarbeitete und erweiterte Aufl., übersetzt von Weineck). Balingen: Spitta Verlag.
- Kindermann, W. (2004). Anaerobe Schwelle. Standards der Sportmedizin. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 55(6).
- Moss, R., Murr, S. & Pierce B. (2008). *Laufen mit System. Weniger Laufen – schneller werden*. Aachen: Meyer & Meyer Verlag.
- Neumann, G., Pfützner, A & Hottenrott, K. (2010). *Das große Buch vom Triathlon*. (2. überarbeitete Aufl.). Aachen: Meyer & Meyer Verlag.
- Neumann, G., Pfützner, A. & Berbalk, A. (2011). *Optimiertes Ausdauertraining*. (6. überarbeitete Aufl.). Aachen: Meyer & Meyer Verlag.
- Perl, J. & Mester, J. (2001). Modellgestützte Analyse und Optimierung der Wechselwirkung zwischen Belastung und Leistung. *Leistungssport*, 31, S. 54-62.
- Perl, J., Dauscher, P. & Hawlitzky, M. (2003). On the long term behaviour of the Performance-Potential-Metamodel Perpot. *International Journal of Computer Science in Sport, Special Edition*, p. 12-21.
- Schurr, S. (2003). *Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung im Ausdauersport*. Norderstedt: Books on Demand GmbH.

- Tampier, M., Endler, S. & Novatchkov, H., Baca, A. & Perl, J. (2011). Development of an Intelligent Real-Time Feedback System. *International Journal of Computer Science in Sport. (2011)*. (Journal 10, ed. 1).
- Tampier, M., Baca, A. & Novatchkov, H. (2012). E-Coaching in Sports. *Proceedings of 2012 Pre-Olympic Congress on Sports Science and Computer Science in Sport (IACSS2012)*. Edgbaston: World Academic Union.
- Weineck, J. (2004). *Optimales Training. Leistungsphysiologische Trainingslehre unter besonderer Berücksichtigung des Kindes und Jugendtrainings* (14. Aufl.). Balingen: Spitta Verlag.
- Zintl, F., & Eisenhut, A. (2004). *Ausdauertraining*. München: BLV Buchverlag GmbH.

7 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Mader-Modell zur Ermittlung der anaeroben Schwelle (Endler, 2013, S. 28).....	15
Abb. 2: Trainingsbereiche im Ausdauersport (Endler, 2013, S. 32).	18
Abb. 3: Trainingsbereiche in Abhängigkeit der IAS (Kindermann, 2004)	19
Abb. 4: Entwicklung der Leistungsfähigkeit bei Belastungsreizen (Weineck, 2004, S. 33)	21
Abb. 5: Adaptionsausmaß durch Training (Weineck, 2004, S. 35).....	22
Abb. 6: Die unterschiedlichen Regenerationszeiten biologischer Teilsysteme (Weineck, 2004, S.35).....	24
Abb. 7: Einfluss der Außentemperatur auf die Herzfrequenz während eines Halbmarathonlaufs (Janssen, 2003).....	25
Abb. 8: Einfluss von Flüssigkeitsverlust auf die Herzfrequenz (Janssen, 2003, S. 78)	27
Abb. 9: Schematische Darstellung des Basis-Metamodells PerPot (Endler, 2013, S. 39) ..	29
Abb. 10: Vereinfachte Darstellung PerPot Modell (mod. nach Tampier et al., 2011).....	30
Abb. 11: PerPot-Kalibrierungslauf P20.....	36
Abb. 12: Aufbau des Mobile Coaching Systems (Baca et al., 2010, S. 10643).....	42
Abb. 13: Mobile Motion Advisor Version 3	43
Abb. 14: Grafische Benutzeroberfläche des Mobile Motion Advisor.....	44
Abb. 15: Erweiterung des MMA mit Modulen zur automatischen Auswertung der Daten (Tampier et al., 2011).	45
Abb. 16: Herzfrequenz-Verlauf des Kalibrierungslauf von P17	54
Abb. 17: Geschwindigkeitsverlauf von P17	55
Abb. 18: Verteilung der schnelleren Laufzeiten.....	58
Abb. 19: Laufbestzeiten unter Berücksichtigung der Reihenfolge.....	60
Abb. 20: Darstellung der Korrelation im Punkt-Strich-Diagramm	64
Abb. 21: Verlauf Abweichung in % zwischen prognostizierter und tatsächlicher Endzeit .	65

8 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Trainingsbereiche prozentual zur iANS	18
Tab. 2: Nachrichten-Formate des MC-Protokolls	46
Tab. 3: Anthropometrische Daten der Probandinnen und Probanden	51
Tab. 4: Ergebnisse und Vergleich PerPot mit freiem Lauf.....	57
Tab. 5:T-Test bei gepaarten Stichproben mit SPSS	59
Tab. 6: Zeitdifferenzen unter Berücksichtigung der Reihenfolge der Läufe.....	60
Tab. 7: T-Test bei gepaarten Stichproben, Reihenfolge Perpot/Frei	61
Tab. 8: T-Test bei gepaarten Stichproben, Reihenfolge Frei/PerPot.....	61
Tab. 9: Relative Abweichung PerPot-Lauf und PerPot-Vorhersage	62
Tab. 10: Korrelations-Test nach Pearson	63
Tab. 11: Vergleich PerPot-Zeit und Prognosen.....	67

9 Anhang

Curriculum Vitae

Persönliche Angaben

Name Georg Alexander Dorn

Anschrift Hauptstraße 28

3375 Krummnußbaum

Tel.: 0664 – 78 20 828

E-Mail: georg@dorn.cc

Geburtsdatum 08.02.1989

Familienstand ledig, keine Kinder

Schulische Ausbildung

1995 – 1999 Volksschule Krummnußbaum

1999 – 2003 Stiftsgymnasium Melk

2003 – 2008 Handelsakademie Ybbs

2009 – 2017 Lehramt Bewegung und Sport & Informatik

Grundwehrdienst

07.07.08 – 06.01.09 Jägerbataillon 19, Pinkafeld

Arbeitstätigkeit

07/2014 – Heute Betriebsführer einer landwirtschaftlichen Firma in
Bucsu, Ungarn

Sprachkenntnisse

Englisch: C1

Ungarisch: B1

EDV-Kenntnisse

Ausgezeichnete Kenntnisse im Umgang mit MS Office Programmen, Microsoft Windows, Internet und Webdesign. Einfache Kenntnisse in Linux und Datenbanken.

Hobbys

Tennis, Laufen, Radfahren, Krafttraining, Computer

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit *selbstständig verfasst habe* und nur die ausgewiesenen Hilfsmittel verwendet habe. Diese Arbeit wurde weder an einer anderen Stelle eingereicht (z. B. für andere Lehrveranstaltungen) noch von anderen Personen (z. B. Arbeiten von anderen Personen aus dem Internet) vorgelegt.