

**TRAINING IM LEISTUNGSSPORT:
MODELLIERUNG UND SIMULATION VON ADAPTATIONSPROZESSEN**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Philosophischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität
zu Kiel

vorgelegt von

Jan-Peter Brückner

Kiel
2006

Erstgutachter: PD Dr. A. Wilhelm

Zweitgutachter: Prof. Dr. B. Weisser

Tag der mündlichen Prüfung: 07.02.2007

Durch den zweiten Prodekan, Prof. Dr. L. Steindorff,
zum Druck genehmigt am: 07.02.2007

INHALTSVERZEICHNIS

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN	IV
VERZEICHNIS DER TABELLEN	VII
1 EINLEITUNG	I
2 MODELLE DER TRAININGSADAPTATION	3
2.1 Belastung und Superkompensation	3
2.2 Das Banister-Modell	6
2.2.1 <i>Modellstruktur</i>	6
2.2.2 <i>Untersuchungsergebnisse und Kritik am Modell</i>	7
2.3 Das Modell der Proteinbiosynthese	9
2.4 Das Metamodell LeiPot	11
2.4.1 <i>Grundlegende Modellstruktur</i>	11
2.4.2 <i>Erweiterungen des LeiPot-Modells</i>	13
2.4.3 <i>Kritik am LeiPot-Modell</i>	15
3 ENTWICKLUNG EINES MODELLS ZUR SIMULATION VON BELASTUNG, ERMÜDUNG UND ANPASSUNG (SIMBEA-MODELL)	20
3.1 Vorbemerkungen zur Modellbildung	20
3.2 Grundstruktur des SimBEA-Modells	21
3.3 Erweitertes SimBEA-Modell	23
3.4 Forschungsfrage	25
4 EMPIRISCHE MODELLPRÜFUNG	26
4.1 Methode der empirischen Untersuchungen	26
4.1.1 <i>Untersuchung 1 und 2 (Einzelfalluntersuchungen)</i>	26
4.1.1.1 <i>Versuchsplanung</i>	26
4.1.1.2 <i>Verfahren der Datenerhebung</i>	28
4.1.1.3 <i>Versuchsperson</i>	30
4.1.1.4 <i>Versuchsdurchführung</i>	31
4.1.1.5 <i>Beschreibung des absolvierten Trainings</i>	32

4.1.2	Untersuchung 3 (Kleingruppenuntersuchung)	33
4.1.2.1	Fragestellung und Versuchsplanung	33
4.1.2.2	Verfahren der Datenerhebung	34
4.1.2.3	Versuchspersonen	36
4.1.2.4	Versuchsdurchführung	36
4.1.2.5	Beschreibung des absolvierten Trainings	37
4.2	Methode der Modellanpassung und Parameterbestimmung	38
4.2.1	Problemstellung	38
4.2.2	Simulationsbasierte Kalibrierung	39
4.2.3	Wertebereiche, Schrittweiten und Startwerte	40
4.2.3.1	Parameter BF	41
4.2.3.2	Parameter AF	41
4.2.3.3	Parameter VA	41
4.2.3.4	Parameter APRmax	42
4.2.3.5	Parameter AR	42
4.2.3.6	Disziplin- bzw. sportartspezifischer Faktor DF	43
4.2.3.7	Startwerte	45
4.2.4	Untersuchungsspezifische Modellanpassung	45
4.2.5	Simulations- und Auswertungssoftware	46
4.3	Modellprüfung	46
4.3.1	Fragestellung 1: Bestimmung eines geeigneten Simulationsintervalls Δt	46
4.3.1.1	Methode und Hypothese	47
4.3.1.2	Statistische Verfahren und Hypothesen	48
4.3.1.3	Ergebnis	48
4.3.1.4	Diskussion	49
4.3.2	Fragestellung 2: Prüfung der Reliabilität des Kalibrierungsverfahrens	50
4.3.2.1	Methode und Hypothesen	50
4.3.2.2	Statistische Verfahren und Hypothesen	52
4.3.2.3	Ergebnisse	53
4.3.2.4	Diskussion	54
4.3.3	Fragestellung 3: Prüfung der Reliabilität	55
4.3.3.1	Methode und Hypothese	55
4.3.3.2	Statistische Verfahren und Hypothesen	56

4.3.3.3	<i>Ergebnisse</i>	56
4.3.3.4	<i>Diskussion</i>	58
4.3.4	Fragestellung 4: Prüfung der Validität	58
4.3.4.1	<i>Methode und Hypothese</i>	59
4.3.4.2	<i>Statistische Verfahren und Hypothesen</i>	59
4.3.4.3	<i>Ergebnisse</i>	60
4.3.4.4	<i>Diskussion</i>	63
4.3.5	Fragestellung 5: Prüfung der prognostischen Validität	66
4.3.5.1	<i>Kurzfristige Prognose</i>	66
4.3.5.2	<i>Mittelfristige Prognose</i>	72
4.3.5.3	<i>Langfristige Prognose</i>	78
4.3.6	Fragestellung 6: Validität der Modellparameter	82
4.3.6.1	<i>Empirische Erkenntnisse zum Zusammenhang von Leistungsfähigkeit und Anpassungsdynamik</i>	82
4.3.6.2	<i>Hypothesen zum Zusammenhang von Leistungsfähigkeit und Parameterausprägung</i>	85
4.3.6.3	<i>Statistische Verfahren und Hypothesen</i>	86
4.3.6.4	<i>Ergebnisse</i>	87
4.3.6.5	<i>Diskussion</i>	90
4.4	Zusammenfassende Diskussion	92
5	ANWENDUNGSBEISPIELE FÜR DAS SIMBEA-MODELL IN DER TRAININGSSTEUERUNG	95
5.1	Retrospektive Trainingsanalyse	95
5.2	Prospektive Trainingswirkungssimulation	98
5.3	Abschließende Bemerkung	101
	ZUSAMMENFASSUNG	102
	LITERATUR	103
	ANHANG	109
	ERKLÄRUNG	122
	LEBENS LAUF	123

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abb. 1: Schema der Superkompensation (nach Grosser, Brüggemann & Zintl, 1986, S. 11)	3
Abb. 2: Struktur des LeiPot-Metamodells als Fließdiagramm (nach Mester & Perl, 2000, S. 48)	13
Abb. 3: Entwicklung des Leistungspotentials LP bei konstanter Belastung im LeiPot-Modell (in Anlehnung an Mester & Perl, 2000)	16
Abb. 4: Entwicklung des Leistungspotentials LP im LeiPot-Modell (Mester & Perl, 2000) für eine einzelne Belastung von 0.1	17
Abb. 5: Kraftzu- und abnahme nach einem einmaligen Training nach Weineck (1997, S. 264)	22
Abb. 6: Nachwirkungen von Trainingseinheiten mit unterschiedlich hoher Belastung nach Platonov (1999, S. 162)	23
Abb. 7: Fiktives Beispiel für die Simulation der Leistungsfähigkeit als Reaktion auf eine Einzelbelastung mit dem SimBEA-Modell	24
Abb. 8: Trainingsbelastung im Einzelfall 1 (Untersuchung 1)	32
Abb. 9: Trainingsbelastung im Einzelfall 2 (Untersuchung 2)	33
Abb. 10: Gegenüberstellung der von Modell $U1_{ungerade}$ und Modell $U1_{gerade}$ berechneten Herzfrequenz-Werte	57
Abb. 11: Gegenüberstellung der von Modell $U2_{ungerade}$ und Modell $U2_{gerade}$ berechneten Herzfrequenz-Werte	57
Abb. 12: Dynamik der mit dem Ausdauer-Standard-Test gemessenen und der simulierten Herzfrequenzwerte für Untersuchung 1	61
Abb. 13: Gegenüberstellung der in Untersuchung 1 mit dem Ausdauer-Standard-Test gemessenen Herzfrequenzen und der zugehörigen simulierten Herzfrequenz-Werte	61
Abb. 14: Dynamik der mit dem Ausdauer-Standard-Test gemessenen und der simulierten Herzfrequenzwerte für Untersuchung 2	62

Abb. 15: Gegenüberstellung der in Untersuchung 2 mit dem Ausdauer-Standard-Test gemessenen Herzfrequenzen und der zugehörigen simulierten Herzfrequenz-Werte	62
Abb. 16: Darstellung der Prognosegüte des SimBEA-Modells (mittlere Pearson-Korrelationen) für einwöchige Leistungsprognosen in Abhängigkeit von der Länge der Kalibrierungsdauer	70
Abb. 17: Verlauf der gemessenen und simulierten Herzfrequenz-Werte in der Kalibrierungs- und Prognosephase für Untersuchung 1	73
Abb. 18: Verlauf der gemessenen und simulierten Herzfrequenz-Werte in der Kalibrierungs- und Prognosephase für Untersuchung 2	74
Abb. 19: Dynamik der wöchentlichen Belastung für Untersuchung 2 mit Markierung der ursprünglichen und erweiterten Kalibrierungs- und Prognosephase	76
Abb. 20: Verlauf der gemessenen und simulierten Herzfrequenz-Werte in der Kalibrierungs- und Prognosephase für Untersuchung 2 bei modifizierter Kalibrierungsphase	77
Abb. 21: Verlauf der in Untersuchung 1 gemessenen Herzfrequenz-Werte und der prognostizierten Werte, die mit dem an Untersuchung 2 kalibrierten SimBEA-Modell berechnet wurden	80
Abb. 22: Zusammenhang zwischen Modellparameter $(AF-1) \cdot BF$ und der Geschwindigkeit im Zeitfahren (v_{ZF})	89
Abb. 23: Zusammenhang zwischen Modellparameter $(AF-1) \cdot BF$ und der Laufgeschwindigkeit an der 3 mmol/l-Laktatschwelle (v_{La3})	89
Abb. 24: Zusammenhang zwischen Modellparameter APR_{max} und der Laufgeschwindigkeit an der 3 mmol/l-Laktatschwelle (v_{La3})	90
Abb. 25: Dynamik der Belastung (B , im Hintergrund dargestellt) und der Anpassungsraten (APR , im Vordergrund dargestellt) für alle Simulationsintervalle von Untersuchung 1 ($t = 8$ h)	96
Abb. 26: Verlauf der simulierten Leistungsentwicklung für die Originalbelastung von Untersuchung 1 und die reduzierte Belastung	97

Abb. 27: Verteilung der Vier-Wochenbelastung auf die einzelnen Wochen	98
Abb. 28: Verteilung der Wochenbelastung auf die einzelnen Wochentage	99
Abb. 29: Dynamik der Tagesbelastungen im Vier-Wochenabschnitt nach Sleamaker (1996) für eine Gesamtbelastung von 15 Belastungseinheiten	99
Abb. 30: Simulierte HF_{AST} nach vier Trainingswochen in Abhängigkeit von der Gesamtbelastung im Vier-Wochenabschnitt	100

VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tab. 1: Modellgleichungen des Banister-Modells (zusammengestellt nach Banister et al., 1986)	7
Tab. 2: Personendaten zu Untersuchung 3	36
Tab. 3: Trainingsprogramm bei Untersuchung 3	37
Tab. 4: Tägliche Trainingsbelastungen (TB_{mod}) zu Untersuchung 3	38
Tab. 5: Korrelationen zwischen Modellparametern und der Leistung im Einzelzeitfahren (v_{ZF}) bzw. der Laufgeschwindigkeit an der 3 mmol/l-Laktatschwelle (v_{La3}) zu Untersuchung 3	88
Tab. 6: Belastungsdaten zu Untersuchung 1	109
Tab. 7: Belastungsdaten zu Untersuchung 2	109
Tab. 8: Leistungsdaten zu Untersuchung 3	114
Tab. 9: Modellparameter für $\Delta t = 24$ h (Fragestellung 1)	114
Tab. 10: Modellparameter für $\Delta t = 8$ h (Fragestellung 1)	114
Tab. 11: Modellparameter für $\Delta t = 4$ h (Fragestellung 1)	115
Tab. 12: Güte der Modellanpassung (Fragestellung 1)	115
Tab. 13: Zufallsgeneriertes Belastungsprofil (Fragestellung 2)	115
Tab. 14: Parameter der Modelle $U1$, F , $F_{80\%}$ und $F_{120\%}$ (Fragestellung 2)	115
Tab. 15: Simulierte HF_{AST} -Werte (Fragestellung 2)	116
Tab. 16: Parameter der Modelle $U1_{ungerade}$, $U1_{gerade}$, $U2_{ungerade}$ und $U2_{gerade}$ (Fragestellung 3)	116
Tab. 17: Simulierte HF_{AST} -Werte (Fragestellung 3)	117
Tab. 18: Parameter der Modelle $U1$ und $U2$ (Fragestellung 4)	117
Tab. 19: Simulierte HF_{AST} -Werte (Fragestellung 4)	118
Tab. 20: Pearson-Korrelationen und Fishers Z-Werte für einwöchige Leistungsprognose (Leistungsmessung täglich) (Fragestellung 5, Hypothese 5.1)	119

VIII

Tab. 21: Pearson-Korrelationen und Fishers Z-Werte für einwöchige Leistungsprognose (Leistungsmessung alle zwei Tage) (Fragestellung 5, Hypothese 5.1)	119
Tab. 22: Pearson-Korrelationen und Fishers Z-Werte für einwöchige Leistungsprognose (Leistungsmessung alle drei Tage) (Fragestellung 5, Hypothese 5.1)	119
Tab. 23: Modellparameter (Fragestellung 5, Hypothese 5.2)	120
Tab. 24: Simulierte HF_{AST} -Werte (Fragestellung 5, Hypothese 5.2)	120
Tab. 25: Simulierte HF_{AST} -Werte (Fragestellung 5, Hypothese 5.3)	121
Tab. 26: Modellparameter zu Untersuchung 3 (Fragestellung 6)	121

1 EINLEITUNG

„Die Planung im Sport – das ist eine Kunst, die dem Trainer, auf bestimmten Prinzipien basierend, die Möglichkeit der schöpferischen Initiative beim Treffen der endgültigen Entscheidung läßt“ (Verchoshanskij, 1988, S. 168).

Obwohl mittlerweile viele Ansätze zur systematischen Belastungsorganisation vorliegen (z.B. Matwejew, 1972; Neumann, Pfützner & Berbalk, 1998; Sleamaker, 1996; Verchoshanskij, 1988, 1992 u.a.), ist die Trainingsplanung offenbar immer noch eine Art künstlerischer Prozess: Sie erfordert Kreativität ebenso wie Entschlossenheit seitens des Trainers, wenn es darum geht, Trainingsbelastungen für einen konkreten Athleten festzulegen. Das Fachwissen der Trainingslehre allein scheint dafür nicht ausreichend zu sein. Und das ist nicht nur darauf zurückzuführen, dass in den Trainingslehren und ihren Prinzipien überwiegend Hinweise fehlen, wie die Belastungssteuerung sportlerspezifisch auszurichten ist (vgl. Wilhelm, 1995, S. 2), dass also die Individualität der Sportler in den Trainingsprinzipien zuwenig beachtet wird. Auch aus erkenntnistheoretischer Sicht ist eine wissenschaftlich begründete Trainingsplanung beim derzeitigen Stand der Theoriebildung in der Trainingswissenschaft kaum möglich. So stellt Selujanov fest:

„Bis heute [kann] kein Experte auf der alten theoretischen Basis sagen, warum an einem bestimmten Trainingstag für einen bestimmten Sportler ganz bestimmte Intensitäts- und Umfangsgrößen der Belastung gewählt werden können bzw. müssen“ (Selujanov, 1999, S. 14).

Mit der „alten theoretischen Basis“ kritisiert der Autor hier die bisherige, rein empirische Grundlage bei der Formulierung vieler Trainingsprinzipien. Ähnliche Bewertungen sind beispielsweise auch schon von Boiko (1990), Tschiene (1996, 1997) und Verchoshanskij (1998) bekannt: So rechtfertige allein der sportliche Erfolg es nicht, das ihm zugrunde liegende trainingsmethodische Vorgehen in den Status eines allgemeingültigen Trainingsprinzips zu erheben. Weder der ursächliche Zusammenhang zwischen der Art des trainingsmethodischen Vorgehens und dem sportlichen Erfolg sei hierdurch belegt, noch sei auszuschließen, dass ein anderes methodisches Vorgehen zu noch besseren sportlichen Leistungen führen könnte. Der sportliche Erfolg könne sowohl wegen als auch trotz der entsprechenden

Trainingsmethodik eingetreten sein. Handlungsempfehlungen auf solcher Grundlage seien in Frage zu stellen.

Demzufolge fordern Selujanov (1999) und Tschiene (1996, 1997), die Theoriebildung in der Trainingswissenschaft und damit letztlich auch die Trainingsplanung auf der Grundlage von Adaptationsmodellen vorzunehmen. Dabei sei der biologische Prozess der Anpassung in den Mittelpunkt der Modellbildung zu stellen, um daraus abgeleitet über rechnergestützte Simulationen Trainingsempfehlungen aussprechen zu können. Auch Verchoshanskij (1998) und Zanon (1999) schreiben biologischen Vorgängen eine herausragende Bedeutung bei der Theoriebildung in der Trainingswissenschaft und damit auch für die Trainingsgestaltung zu. Mittlerweile bestätigt auch Hohmann (2005) die Bedeutung der computerbasierten Trainings-Wirkungs-Modellierung bei der Steuerung sportlicher Spitzenleistungen:

„Mit solchen Modellen kann auf der Basis vorab ermittelter, individueller mathematisch-statistischer Funktionszusammenhänge eine simulative Folgenabschätzung für die geplanten Trainingsinterventionen vorgenommen werden“ (Hohmann, 2005, S. 58).

Und diese Trainingswirkungsanalyse ermögliche nach Hohmann (2005) dann unter Berücksichtigung individueller Besonderheiten eine termingenaue Formsteuerung bei der Anpassung des Athleten an das jeweilige Trainingsprogramm.

Bisher haben Banister (z.B. Banister, Good, Holman & Savage, 1986), Mader (1990) und Perl (z.B. Mester & Perl, 2000) derartige Modelle vorgestellt. Diese Ansätze werden in der vorliegenden Arbeit diskutiert (Kap. 2), um anschließend ein eigenes Modell zur Simulation von Trainingswirkungen herzuleiten (Kap. 3). Ziel der Arbeit ist es, ein praktikables Modell zur Simulation von Trainingswirkungen zu schaffen und somit einen Beitrag zu mehr Planungssicherheit im Trainingsprozess zu leisten. Das Modell wird schließlich anhand von zwei Einzelfalluntersuchungen an einem Ausdauersportler und anhand einer Kleingruppenuntersuchung mit D-Kader Triathleten empirisch geprüft (Kap. 4). Beispiele für die Anwendung des Modells in der Trainingspraxis runden die Arbeit ab (Kap. 5).

2 MODELLE DER TRAININGSADAPTATION

2.1 Belastung und Superkompensation

Das Ziel leistungssportlichen Trainings ist die Steigerung der sportlichen Leistungsfähigkeit oder die Aufrechterhaltung eines bereits erreichten hohen Leistungsniveaus. Dass die sportliche Leistungsfähigkeit überhaupt trainierbar ist, ist mit der funktionellen Anpassung des Körpers an die Anforderungen des Trainings zu erklären. Nach Schnabel, Harre und Borde (1994) sind grundsätzlich zwei verschiedene Mechanismen der Adaptation zu unterscheiden, je nachdem ob die Anpassungen die Prozesse der Handlungs- und Bewegungsregulation oder die Prozesse der Energiebereitstellung und -umwandlung betreffen. Letztere sind im Zusammenhang mit der Belastungsplanung des Trainings von besonderer Bedeutung.

Jakowlew hat umfangreiche Untersuchungen der morphologisch-funktionellen Anpassungen an Trainingsbelastungen durchgeführt (für einen Überblick siehe Jakowlew, 1977). Dabei stellte er mehrfach fest, dass auf den belastungsbedingten Abbau von Energiereserven bzw. auf die funktionelle Nutzung von Proteinen eine Phase der vermehrten Synthese mit einer überschießenden Wiederherstellung folgt, der sogenannten Superkompensation (vgl. Abb. 1).

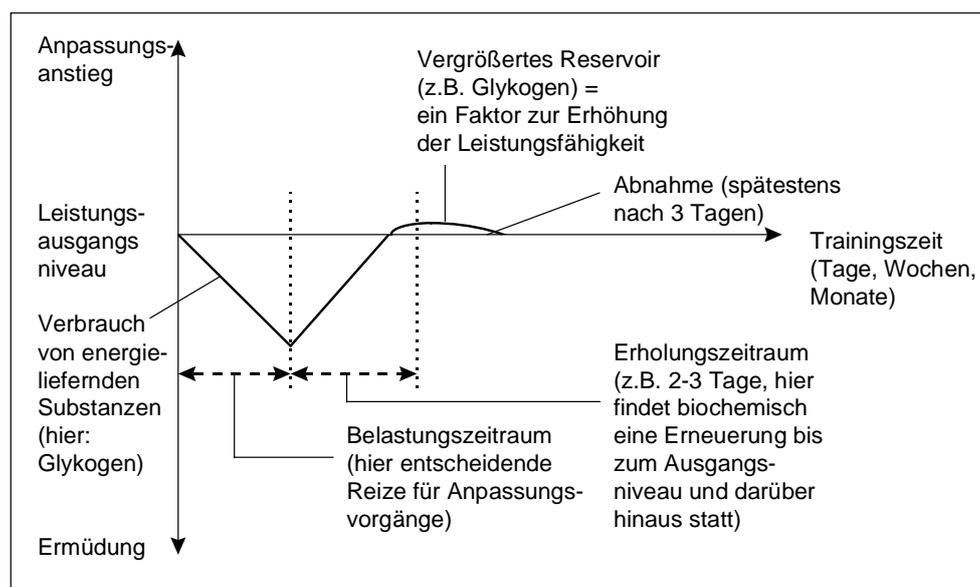


Abb. 1: Schema der Superkompensation (nach Grosser, Brüggemann & Zintl, 1986, S. 11)

Ähnliche Phänomene wurden schon Ende des 19. Jahrhunderts bei Heilungsprozessen von verletzten Geweben oder bezüglich der Funktion von Bauchspeicheldrüse und Herz beobachtet (vgl. Jakowlew, 1977; Tschiene, 2006). Jakowlew (1977) gelang es, das Superkompensationsprinzip auch bei der körpereigenen Produktion von Kreatinphosphat, Glykogen, strukturellen Proteinen und Enzymen sowie beim Aufbau von Muskelfasern und Mitochondrien nachzuweisen. In Biosystemen führen demnach funktionsbedingte Abbauprozesse allgemein zu einer Steigerung der Resynthese und damit zu einer erhöhten Kapazität des Systems.

Das Superkompensationsprinzip ist heute insbesondere aus der populärwissenschaftlichen Trainingsliteratur kaum mehr wegzudenken. Die mit dem Superkompensationsprinzip in Zusammenhang gebrachten Schlussfolgerungen sind dabei vielfältig: So soll das Modell der Superkompensation positive und negative Entwicklungen der Leistungsfähigkeit erklären oder beispielsweise auch zur Planung des richtigen Belastungs- und Pausenverhältnisses herangezogen werden können. Im Regelfall wird postuliert, dass für den besten Effekt optimalerweise im Punkt der höchsten Superkompensation die nächste Trainingsbelastung zu folgen hat (vgl. auch Jakowlew, 1977). Die vermeintliche Exaktheit, die sich für die Planung des Trainings ergibt, wenn erst einmal bekannt ist, wann dieser Zeitpunkt erreicht ist, erklärt möglicherweise die Popularität des Modells. Dass allerdings der Zeitpunkt der Superkompensation in der Praxis bisher kaum zu ermitteln war, scheint der weiten Verbreitung keinen Abbruch zu tun, was auch mit der Einfachheit des Modells zusammenhängen mag.

In der wissenschaftlichen Diskussion dagegen wird die Superkompensation auch kritisch gesehen (vgl. Friedrich & Moeller, 1999; Mader, 1990; Tschiene, 2006). Die Kritik bezieht sich dabei weniger auf Jakowlew und das Superkompensations-*Phänomen* an sich, als vielmehr auf ungerechtfertigte und z.T. unzutreffende Verallgemeinerungen und Ableitungen, die das Phänomen Superkompensation hochstilisieren zu einem allgemeinen *Modell* des Trainings. Einen ganz wesentlichen Kritikpunkt äußert z.B. Mader (1990). Er stellt fest, dass das Modell nicht eindeutig erkennen lasse, welches Regelungsprinzip ihm zugrunde liege. Danach sei das Superkompensationsmodell nichts weiter als eine reine Beschreibung des System-*verhaltens* bei einer einzelnen Belastung, ohne dass bekannt sei, durch welchen

Mechanismus dieses Verhalten zustande komme. Für andere Bedingungen ließen sich auf dieser Grundlage dann auch keine begründeten Aussagen zum voraussichtlichen Verhalten treffen. Beispielsweise: Wie wirken sich mehrere Belastungen in Folge auf die Leistungsfähigkeit aus? Kommt es im Anschluss an eine Serie von Belastungen bei unvollständiger Erholung zur erhöhten Superkompensation? Wie hoch ist diese, oder bleibt der Leistungsanstieg aus, weil etwa potentielle Superkompensationseffekte wegen der zu kurzen Regenerationszeiten zwischen den Belastungen quasi „verpuffen“?

Ein weiterer wichtiger Kritikpunkt am Modell der Superkompensation ist darin zu sehen, dass individuelle Besonderheiten hinsichtlich der Reaktivität auf Trainingsbelastungen nicht berücksichtigt werden (vgl. Friedrich & Moeller, 1999). Wie hoch ist im Einzelfall die Superkompensation? Hängt diese vom individuellen Niveau der Anpassung ab? Denn im Trainingsalltag zeigen sich im Allgemeinen klare Unterschiede in der Trainierbarkeit, insbesondere zwischen verschiedenen Leistungsklassen. Da das Modell der Superkompensation dem Anpassungsgrad nicht Rechnung trägt, wären demnach Anpassungen auch unendlich fortsetzbar. Besonders hier stößt das Modell bei mehreren Autoren auf Kritik, da von genetischen Grenzen der individuellen Anpassungsfähigkeit auszugehen ist (vgl. Mader, 1990; Martin, Carl & Lehnertz, 1991; Verchoshanskij & Viru, 1990).

Die kritischen Ausführungen zur Superkompensation machen eines deutlich: Bei der von Jakowlew (1977) beschriebenen Superkompensation handelt es sich um ein im Training beobachtbares Phänomen, keinesfalls jedoch um ein umfassendes und allgemeines Modell des Trainings. Denn eindeutige Empfehlungen für die Trainingsplanung, insbesondere im (Hoch-)Leistungssport, lassen sich aus dem Superkompensations-Phänomen nicht ableiten. Derartige Empfehlungen müssen auf Modellen basieren, die auch die verborgenen *Prozesse* berücksichtigen, die dem beobachteten Phänomen der Superkompensation zugrunde liegen, also den Mechanismus der Wechselwirkung zwischen Belastung einerseits und Anpassung der Leistungsfähigkeit andererseits.

Modelle im eigentlichen Sinne sind das Banister-Modell (z.B. Banister et al., 1986), das Modell der Proteinbiosynthese von Mader (1990) und das LeiPot-Modell von Perl (z.B. Mester & Perl, 2000). Diese Ansätze zur Simulation der belastungsabhängigen Leistungsentwicklung werden im Folgenden vorgestellt und diskutiert.

2.2 Das Banister-Modell

Ein Modell, das die Wechselwirkung von Belastung und sportlicher Leistungsfähigkeit zum Gegenstand hat, wurde von Banister vorgestellt (Banister, Calvert, Savage & Bach, 1975; Banister et al., 1986; Morton, Fitz-Clarke & Banister, 1990). Das Banister-Modell, auch *fitness-fatigue*-Modell (z.B. Hohmann, Lames & Letzelter, 2002, S. 174) oder Zwei-Faktoren-Theorie (Zatsiorsky, 1996, S. 28) genannt, ist als anspruchsvollere Alternative zum zu einfachen Superkompensationsmodell anzusehen (Zatsiorsky, 1996, S. 28). So beschreibt das Banister-Modell nicht nur schematisch die Entwicklung der Leistungsfähigkeit nach einer Einzelbelastung, sondern es entwirft auch einen - wenn auch einfach gehaltenen - *Mechanismus*, nach dem sich der Zustand des Sportlers in Folge mehrerer Trainingsbelastungen verändern soll. Über entsprechende Modellgleichungen lassen sich die Effekte der Belastung auf die Leistungsfähigkeit simulieren, so dass der „Vorbereitungszustand“ (Zatsiorsky, 1996, S. 28) des Athleten kalkulierbar wird.

2.2.1 Modellstruktur

Entsprechend dem Grundgedanken des Banister-Modells unterliegt der Vorbereitungszustand eines Athleten gewissen Schwankungen, die durch Trainingsbelastungen verursacht werden. Jede Trainingseinheit hat eine positive und eine negative Auswirkung auf diese „potentielle sportliche Leistungsfähigkeit“ (Zatsiorsky, 1996, S. 28). Beide Effekte treten impulsartig auf, überlagern sich aber gegenseitig (vgl. Banister et al., 1986): Einerseits erhöht das Training unmittelbar nach der Belastung die Leistungsfähigkeit, andererseits führt es zu einer Ermüdung, die den Vorbereitungszustand beeinträchtigt. Beide Effekte werden im Laufe der Zeit abgebaut. Die Leistungsfähigkeit sieht Zatsiorsky (1996) als stabilere, länger überdauernde Komponente an, während die Ermüdung ein latentes Merkmal sei, das einem schnelleren Abbau unterliege:

„Die Ermüdungswirkung ist größer, aber von relativ kurzer Dauer. In grober Näherung gilt, daß sich bei einer mittleren Trainingsbelastung die Dauer der Leistungszunahme und der Ermüdungseffekt um den Faktor 3 unterscheiden: Die Ermüdung dauert nur ein Drittel der Zeit“ (Zatsiorsky, 1996, S. 29).

Im mathematischen Modell werden diese Trainingsnachwirkungen mit Exponentialfunktionen beschrieben, ähnlich wie sie beispielsweise vom radioaktiven Zerfall bekannt sind. So lässt sich dann zu einem beliebigen Zeitpunkt t nach einer Trainingseinheit die Größe der Leistungsfähigkeit und der Ermüdung berechnen. Der Vorbereitungszustand $P(t)$ zum Zeitpunkt t ergibt sich schließlich aus der Differenz von Leistungsfähigkeit und Ermüdung (s. Tab. 1).

Tab. 1: Modellgleichungen des Banister-Modells (zusammengestellt nach Banister et al., 1986)

Leistungsfähigkeit:	$Fit(t) = Fit_0 + K_{Fit} * I * e^{-t/\tau_{Fit}}$
Ermüdung:	$Fat(t) = Fat_0 + K_{Fat} * I * e^{-t/\tau_{Fat}}$
Vorbereitungszustand:	$P(t) = Fit(t) - Fat(t)$
Fit ₀ : Ausgangsniveau der Leistungsfähigkeit; Fat ₀ : Ausgangsniveau der Ermüdung; K _{Fit} und K _{Fat} : spezifische Gewichtungsfaktoren; I: Trainingsimpuls (=Belastungsmaß einer Trainingseinheit); τ_{Fit} und τ_{Fat} : spezifische Zeitkonstanten	

2.2.2 Untersuchungsergebnisse und Kritik am Modell

Die Arbeiten von Banister et al. (1975), Banister und Hamilton (1985) und Banister et al. (1986) zeigen, dass sich mit dem *fitness-fatigue*-Modell bei geeigneter Wahl der Zeitkonstanten das Phänomen der Superkompensation simulieren lässt. In mehreren Studien wurde das Modell schon zur Simulation und Analyse von Belastungseffekten auf physiologische Parameter zum Eisenstatus von Sportlern (Banister & Hamilton, 1985; Banister et al., 1986; Candau, Busso & Lacour, 1992), auf die psychologischen Parameter Angst und wahrgenommene Ermüdung (Millet, Gros Lambert, Barbier, Rouillon & Candau, 2005) sowie auf die sportliche Leistungsfähigkeit insbesondere in Ausdauersportarten eingesetzt (Banister et al., 1986; Morton et al., 1990; Busso, Benoit, Bonnefoy, Feasson & Lacour, 1997; Busso, Benoit, Bonnefoy, Feasson & Lacour, 2002; Millet et al., 2002). Außerdem wurde das Banister-Modell mehrfach zur Simulation des Taperings eingesetzt, wie es in der unmittelbaren Wettkampfvorbereitung vor wichtigen Wettkämpfen durchgeführt wird (Mujika et al., 1996; Banister, Carter & Zarkadas, 1999; Fitz-Clarke, Morton & Banister, 1991; Thomas & Busso, 2005).

Kritisch festzustellen ist, dass in einigen Studien die Leistungsfähigkeit bzw. der zu modellierende Parameter nur über wenige Messwerte erfasst wird (z.B. Banister & Hamilton, 1985; Banister et al., 1986). Bedauerlicherweise fehlen außerdem teilweise Angaben zur Güte der erreichten Modellanpassung an die realen Messwerte (z.B. Banister et al., 1986; Banister et al., 1999). Davon abgesehen zeigen sich jedoch bei den vorliegenden Untersuchungen mittlere bis hohe Korrelationen zwischen der gemessenen und der simulierten Leistung: Mujika et al. (1996) finden bei 17 Schwimmern Zusammenhänge zwischen $r = .67$ und $r = .92$ ($p < .05$). Morton et al. (1990) erreichen bei zwei Läufern Modellanpassungen von $r = .84$ ($p < .001$) und $r = .98$ ($p < .0001$). Bei vier Spitzentriathleten ergibt sich insgesamt eine Modellanpassung von $r = .37$ ($p < .05$) für die Disziplin Schwimmen und von $r = .74$ ($p < .001$) für die Disziplin Laufen (Millet et al., 2002).

Während bei den drei genannten Untersuchungen von Morton et al. (1990), Mujika et al. (1996) und Millet et al. (2002) jeweils die optimalen und über den gesamten Untersuchungszeitraum *konstanten* Modellparameter bestimmt wurden, prüfen Busso et al. (1997), inwiefern sich durch in gewissem Maße zeitlich *variable* Parameter die Modellanpassung verbessern lässt. Bei zwei Freizeit-Radsportlern ergeben sich Korrelationen von $r = .82$ und $r = .83$ bei über eine Zeitspanne von 14 Wochen konstanten Modellparametern. Für zeitvariable Parameter steigt die Güte der Modellanpassung in beiden Fällen auf $r = .94$. Noch höhere Korrelationen ($r = .98$ bis $r = .99$) konnten auch Busso et al. (2002) für zeitvariable Parameter bei sechs Sportlern ermitteln. Busso et al. (1997) stellen fest, dass zeitvariable Parameter den sehr komplexen Anpassungsprozess besser erfassen können als konstante Parameter. Sie sehen im Banister-Modell mit zeitvariablen Parametern vor allem ein nützliches Hilfsmittel zur Analyse von Anpassungsprozessen (vgl. Busso et al., 1997).

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse zeigen, dass auch mit konstanten Modellparametern überwiegend gute Simulationsergebnisse zu erzielen sind. Die Korrelationen zwischen den berechneten und simulierten Leistungswerten sprechen dafür, dass mit dem Banister-Modell belastungsabhängige Ermüdungs-, Erholungs- und Superkompensationseffekte relativ gut modelliert werden.

Nicht simulierbar sind mit dem Banister-Modell dagegen Leistungseinbrüche im Sinne eines Übertrainings (Israel, 1976) oder eines Kollapseffekts. Darunter

verstehen Mester und Perl (2000) den plötzlichen Zusammenbruch der Leistungsfähigkeit, der auf ein nicht mehr kompensierbares Belastungsmaß zurückgeführt werden kann. Derartige Effekte treten im Banister-Modell nicht auf, denn jede noch so hohe Belastung hat im Modell zwar einen Ermüdungseffekt, dieser geht jedoch allmählich zurück und wird dann vom langsamer abnehmenden leistungssteigernden Effekt übertroffen. Es kommt also in jedem Fall zur Superkompensation. Und je höher die Belastung ist, desto höher ist die Superkompensation.

Damit wären im Banister-Modell Anpassungsprozesse unendlich fortsetzbar und das Leistungsniveau ließe sich durch Training unendlich steigern. Dies aber widerspricht nicht nur den Erfahrungen und Auffassungen der Sportwissenschaft (vgl. Mader, 1990; Martin et al., 1993; Verchoshanskij & Viru, 1990), sondern ist gerade für praktische Einsatzzwecke im Hochleistungstraining oder Rehabilitationstraining riskant, bewegen sich die Athleten bzw. Patienten doch auf einem schmalen Grat zwischen optimaler Belastung und Übertraining bzw. Überforderung. Gerade hier sollen Trainingssimulationen Überlastungen vermeiden helfen, vorausgesetzt das Überlastungsphänomen ließe sich zutreffend simulieren. Dafür jedoch ist das Banister-Modell nicht geeignet.

Bezüglich der Modellstruktur ist außerdem kritisch anzumerken, dass die leistungsverbessernde Wirkung des Trainings im Modell impulsartig, d.h. ohne zeitliche Verzögerung auftritt. Direkt nach der Belastung erhöht sich die Leistungsfähigkeit $Fit(t)$, um dann langsam wieder abzunehmen. Reale Anpassungsprozesse dagegen umfassen viele in Serie stattfindende biochemische Reaktionen, beispielsweise die Aktivierung der Proteinsynthese, die Syntheseprozesse selbst und schließlich den Einbau der fertigen Proteine (Mader, 1990). Diese Prozesse benötigen viel Zeit. Für das Krafttraining wird beispielsweise angenommen, dass die Synthese der neuen Proteine bis zu 72 Stunden dauern kann (Platonov, 1999; Weineck, 1997). Der Anpassungsmechanismus des Banister-Modells weicht von dem realen Prozess damit erheblich ab.

2.3 Das Modell der Proteinbiosynthese

Mader (1990) wählt verglichen mit dem Banister-Modell einen wesentlich konkreteren Ansatz zur Simulation der belastungsabhängigen Anpassung: Er setzt an der

Vorstellung an, dass die Funktionssysteme von Organismen zum großen Teil aus Proteinen bestehen, die die spezifischen Funktionen erfüllen. Die Leistungsfähigkeit des Organismus und seiner Teilsysteme hängt dementsprechend im Wesentlichen vom Bestand an funktioneller Proteinmasse der betreffenden Systeme ab. Dieses gilt sowohl für die Krafftähigkeit eines Muskels, die entscheidend durch seine Masse an kontraktilen Proteinen bestimmt wird, als auch für andere Komponenten der sportlichen Leistungsfähigkeit. Beispielsweise ist für die aerobe Leistungsfähigkeit nach Mader (1990) insbesondere der Proteinbestand der energieumwandelnden mitochondrialen Enzymsysteme von entscheidender Bedeutung. Allgemein kann die Bedeutung der Proteinsynthese als ein grundlegender Anpassungsmechanismus an konditionelle Belastungen als akzeptiert und gesichert angesehen werden (bspw. Hollmann & Hettinger, 2000; Weicker & Strobel, 1994; Weineck, 1997). Der Einsatz eines Modells der Proteinbiosynthese erscheint damit in vielfältigen Bereichen des konditionellen Trainings zur Simulation von Anpassungsprozessen als sehr geeignet.

Nach Maders Vorstellungen (1990) unterliegen alle funktionellen Eiweißstrukturen einem ständigen Umbauprozess. Alte Proteine werden abgebaut und neue aufgebaut (Protein-Turnover), und das Verhältnis von Proteinsynthese zu Protein-degradation bestimmt nun, ob der Bestand spezifischer Eiweiße (und damit die spezifische Leistungsfähigkeit) langfristig zu- oder abnimmt.

Mader (1990) beschreibt einen Mechanismus, der die Aktivierung der Synthese von Proteinen in Abhängigkeit von der spezifischen Beanspruchung erklärt: Danach kommt es durch die gesteigerte Beanspruchung zu einem verstärkten Proteinabbau, der auch als vorübergehende Abnahme der spezifischen Leistungsfähigkeit anzusehen ist. Bei dem Proteinverschleiß entstehen nach Maders (1990) Vorstellungen Proteinbruchstücke, die den genetischen Apparat der Zelle aktivieren, so dass es zu einem Anstieg der Konzentration an Messenger-Ribonukleinsäure (mRNA) kommt. Der gesteigerte mRNA-Gehalt führt dann zu einer vorübergehenden Zunahme der Proteinsyntheserate und somit zu einem Anstieg der spezifischen Leistungsfähigkeit. Training schafft also über die kurzzeitige Abnahme der Leistungsfähigkeit die Voraussetzungen für eine anschließende Leistungssteigerung.

Diese Vorstellungen zur Regelung der Proteinsynthese hat Mader (1990) in ein System von Differentialgleichungen umgesetzt, um damit den Proteinbestand in Abhängigkeit von der Belastungseinwirkung simulieren zu können:

Wird die mittlere Belastung eines Systems langfristig erhöht, so kommt es zu einem stabilen Leistungszuwachs. Er ist gekennzeichnet durch ein neues Fließgleichgewicht von belastungsabhängigem Strukturverschleiß und Proteinsynthese. Da die Syntheserate von Proteinen als begrenzt anzusehen ist (vgl. Hollmann & Mader, 2000), kann aus diesen Überlegungen abgeleitet werden, dass sich eine Hypertrophie nicht unendlich ausweiten lässt. Die Fähigkeit zur Anpassung ist nach diesen Modellvorstellungen also begrenzt. Wird die Belastung kontinuierlich erhöht, so ist ab einem bestimmten Punkt der belastungsbedingte Strukturverschleiß nicht mehr durch eine gesteigerte Proteinsyntheserate kompensierbar und es kommt zum Zusammenbruch des Systems.

Von allgemeinen Simulationen einmal abgesehen ist das Modell von Mader (1990) allerdings nur bedingt einsetzbar. Aufgrund der komplizierten mathematischen Struktur des Modells sowie der Vielzahl von Modellparametern und rechentechnischen Problemen ist die konkrete Modellanpassung an reale Systeme (noch) nicht möglich, so dass ein Einsatz des Modells in der Trainingspraxis fraglich erscheint (vgl. Mader, 1990). Simulationen zum Zwecke der Trainingsplanung und -steuerung erfordern demnach einfachere Modellansätze, wenn es um mathematische Praktikabilität und praxisnahe Anwendbarkeit geht.

2.4 Das Metamodell LeiPot

2.4.1 Grundlegende Modellstruktur

Während sich Maders (1990) Modell konkret am realen Mechanismus der Anpassung orientiert, wählt Perl einen völlig anderen Ansatz (z.B. Mester & Perl, 2000; Perl, 1998, 2002 b; Perl & Mester, 2001): Das sogenannte **Leistungs-Potential**-Modell LeiPot (oder PerPot für **Performance Potential**) simuliert die belastungsabhängige Veränderung der Leistungsfähigkeit im Sinne eines allgemeinen Metamodells. Das bedeutet, das LeiPot-Modell hat kein konkretes, real existierendes *System* zum Vorbild wie herkömmliche Modelle, sondern es stellt ein Modell von *Modellen* dar, die ähnliche Eigenschaften aufweisen und ähnliche Verhaltensweisen zeigen. Demnach leiten sich die Strukturkomponenten des Modells nicht vom realen Anpassungsprozess ab. Statt dessen steht das geforderte

Modellverhalten im Mittelpunkt der Modellbildung und die Modellstruktur wird so gewählt, dass das Modell eben genau dieses Verhalten simulieren kann.

Das Ziel ist es, folgende drei Phänomene mit dem LeiPot-Modell simulierbar zu machen (vgl. Mester & Perl, 2000):

1. einen Superkompensations-Effekt bei konstantem Belastungsprofil,
2. einen Kollapseeffekt bei Überlastung,
3. einen umgekehrt U-förmigen Zusammenhang von Leistungsfähigkeit und Belastung.

Die Grundstruktur des Modells ergibt sich aus Erfahrungen in anderen Anwendungsfeldern der Informatik, die auf die Problematik von Belastung und Anpassung im Sport übertragen werden:

„Erfahrungen aus der Modellierung von Transportsystemen und mathematische Analysen der entsprechenden Dynamiken legen [den Ansatz] für die Basis-Struktur [...] nahe“ (Mester & Perl, 2000, S. 46).

Wesentliches Merkmal des LeiPot-Modells ist die antagonistische Struktur. Ähnlich wie im Banister-Modell (Banister et al., 1986) hat Training einen positiven und einen negativen Effekt auf die Leistungsfähigkeit (vgl. Abb. 2). Im Gegensatz zum Zwei-Faktoren-Modell wirkt sich die Trainingsbelastung allerdings nicht sofort auf die Leistungsfähigkeit aus, sondern die Belastung wird zuvor gleichermaßen in zwei Potentialen zwischengespeichert: im Belastungspotential (BP) und im Entwicklungspotential (EP). Das BP hat einen negativen und das EP einen positiven Einfluss auf die Leistungsfähigkeit, das sogenannte Leistungspotential (LP). Die Flüsse vom BP und EP zum LP unterliegen dabei spezifischen zeitlichen Verzögerungen. Sie beeinflussen entscheidend die Dynamik des Systems.

Die Berechnung der einzelnen Modellzustände erfolgt über Differenzgleichungen in diskreten Schritten. D.h. der Zustand eines Potentials ergibt sich aus dem jeweils vorhergehenden Zustand und den entsprechenden Flussraten zwischen den Potentialen. Die Schrittweite Δt lässt sich bei der Simulation frei wählen.

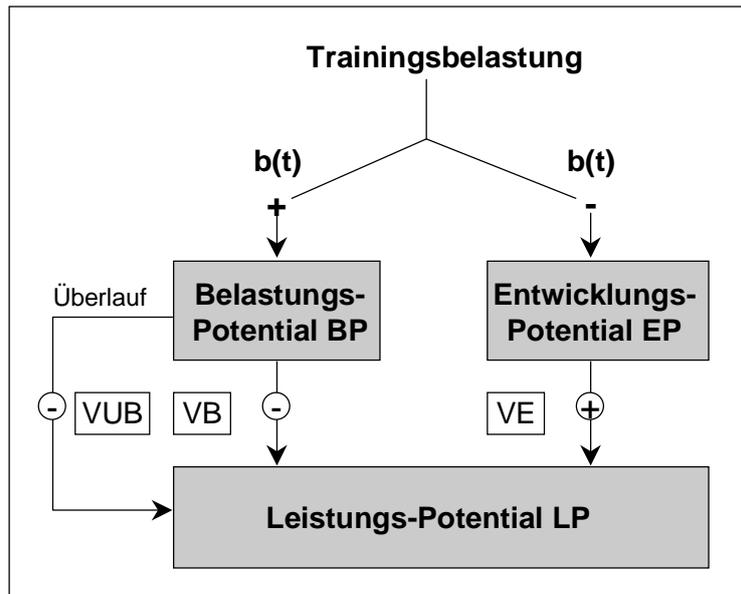


Abb. 2: Struktur des LeiPot-Metamodells als Fließdiagramm (nach Mester & Perl, 2000, S. 48).
 $b(t)$: Belastung zum Zeitpunkt t ; VB: Verzögerung des Abbaus des BP; VE: Verzögerung des Abbaus des EP; VUB: Verzögerung des Überlaufs des BP

Weitere strukturelle Merkmale des Modells sind die Potentialgrenzen des Entwicklungs-, Belastungs- und Leistungspotentials und eine Überlauffunktion. Potentialgrenzen dürfen bei der Simulation nicht überschritten werden, was nach Mester und Perl (2000) durch entsprechende Minimum- und Maximum-Operatoren in den Modellgleichungen sichergestellt werden soll. Die Grenzen führen u.a. dazu, dass die Leistungsfähigkeit des Systems beschränkt und die Belastbarkeit des Systems begrenzt ist. Wird die Obergrenze des Belastungspotentials bei hohen Belastungsraten überschritten, so sorgt ein Überlaufmechanismus im Modell dafür, dass die Leistungsfähigkeit mit einer geringeren zeitlichen Verzögerung reduziert wird, also schnell abnimmt. Langfristige Überlastung führt so zum Zusammenbruch der Leistungsfähigkeit.

2.4.2 Erweiterungen des LeiPot-Modells

Im vorausgehenden Abschnitt wurde die grundlegende Struktur des LeiPot-Modells beschrieben, wie sie von Mester und Perl (2000) vorgestellt wurde. In neueren Arbeiten hat Perl (Perl, 2002 a; 2003; 2004; Perl, Dauscher & Hawlitzky, 2003) Ergänzungen des Modells vorgestellt, die die Einsatzmöglichkeiten des LeiPot-Modells erheblich erweitern. Auf einige dieser Neuerungen wird im Folgenden eingegangen:

Eine weitere Flussrate vom Leistungspotential LP zum Entwicklungspotential EP soll beispielsweise eine permanent stattfindende Atrophie mit der Verzögerung VA simulieren (Perl, 2002 a). Durch diese Erweiterung soll das Modell auch langfristige Adaptationsprozesse simulieren können, bei denen kontinuierliche Rückgänge der Leistungsfähigkeit im Sinne einer Atrophie eine Rolle spielen.

In Simulationsversuchen zeigt Perl, dass durch zeitvariable Verzögerungen die Genauigkeit der Simulation gegenüber Simulationen mit konstanten Verzögerungen erhöht werden kann (Perl & Mester, 2001; Perl, 2004). Dabei werden für jedes Simulationsintervall die optimalen Verzögerungen aus den vorliegenden Belastungs- und Leistungsdaten bestimmt. Einen ähnlichen Effekt konnten Busso et al. (1997) auch für zeitvariable Parameter beim Banister-Modell nachweisen (vgl. 2.2.2).

In einer Erweiterung des einfachen LeiPot-Modells benutzt Perl (Perl, 2002 a; 2003; Perl et al. 2003) nun ein zweites, internes LeiPot-Modell, um in Abhängigkeit von der Belastung die Veränderung der Verzögerungen des ersten, externen LeiPot-Modells zu modellieren. Simulationsversuche mit diesem sog. 2-level-PerPot ergeben ähnlich gute Übereinstimmungen von simulierten und vorgegebenen Leistungswerten wie bei den Simulationen mit dem einfachen Modell, ohne dass dabei allerdings die lokalen Verzögerungen direkt an die vorgegebenen Daten angepasst werden müssen (vgl. Perl, 2003).

Das 2-level-PerPot-Modell erweitert Perl (2003) nochmals für Simulationen, die die gesamte Lebensspanne von Organismen umfassen. Dazu wird ausgehend von einer stetig abnehmenden vital energy und einer spezifischen Verzögerung das sogenannte vital potential VP modelliert. Dieses vital potential steuert im 2-level-Modell die Höhe der Verzögerungen des internen LeiPot-Modells. Hierdurch erreicht Perl, dass sich das Anpassungsverhalten des externen LeiPot-Modells im Laufe des Lebens verändert: Anfangs nimmt die Anpassungsgeschwindigkeit zu, im höheren Lebensalter fällt sie wieder ab.

Perl (2003) betont, dass noch viele Fragen offen sind, die dieses komplexe dynamische Modell auf LeiPot-Basis betreffen, und dass diese aufgrund der Komplexität der zu simulierenden Prozesse möglicherweise nie quantitativ zu beantworten sein werden. Abschließend stellt Perl (2003) dazu fest:

„But even then the modelling of qualitative phenomena – which PerPot was originally thought for – might be helpful for a better understanding of the basic dynamics and preventing bad effects“ (Perl, 2003, p. 11).

2.4.3 Kritik am LeiPot-Modell

Perl und Mester (2001) sowie Perl (2004) führen einige Beispiele an, in denen das LeiPot-Modell erfolgreich an realen Trainingsdaten kalibriert wird. So simulieren sie erfolgreich die Wechselwirkung zwischen Trainingsbelastung und Hämoglobinkonzentration oder das Anpassungsverhalten der Herzfrequenz an Belastungen. Simulationsrechnungen mit fiktiven Belastungs- und Leistungsdaten zeigen außerdem, dass das LeiPot-Modell bei geeigneter Wahl der Verzögerungen wie gefordert bei einem konstanten Belastungsprofil positive Anpassungseffekte und bei stetig ansteigender Belastung einen umgekehrt U-förmigen Verlauf der Leistungsentwicklung und damit auch einen Kollaps-Effekt simulieren kann (Mester & Perl, 2000). Doch trotz dieser positiven Simulationsergebnisse sollen die Struktur und das Verhalten des einfachen LeiPot-Modells im Folgenden kritisch betrachtet werden:

Der positive Anpassungseffekt bei konstanter Belastung ähnelt dem bereits vorgestellten Phänomen der Superkompensation. Allerdings ist ein wesentlicher Unterschied offensichtlich: Im klassischen Schema wird die Superkompensation als überschießende Anpassungsreaktion an eine *Einzelbelastung* aufgefasst. Belastungen führen hier erst zum Leistungsrückgang und dann in der Erholungsphase zum Leistungszuwachs. Im LeiPot-Modell zeigt sich die positive Anpassungsreaktion dagegen bei einem konstanten (und ausreichend hohen) Belastungsprofil, also bei *fortschreitender* Belastung. Dabei kommt es während einer Belastung, die sich über viele Simulationsintervalle erstreckt, erst zu einem *allmählichen* Abfall der Leistung und dann zur allmählichen Leistungssteigerung noch *während* der Belastung (s. Abb. 3).

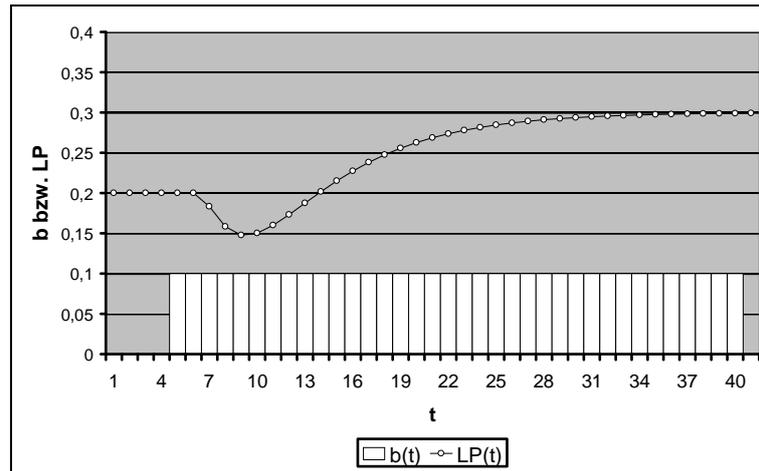


Abb. 3: Entwicklung des Leistungspotentials LP bei konstanter Belastung im LeiPot-Modell (in Anlehnung an Mester & Perl, 2000). Ab $t = 5$ ist $b(t) = 0.1$. Als Parameter und Startwerte wurden $VB = 3$, $VE = 6$, $VUB = 1.5$, $LP(0) = 0.2$, $EP(0) = 0$, $BP(0) = 0$ gewählt. Es zeigt sich erst eine Abnahme des LP und anschließend, noch während der Belastung, ein Anstieg über das Ausgangsniveau.

Dieses charakteristische Modellverhalten entspricht also weniger den klassischen Vorstellungen des Superkompensations-Schemas als vielmehr einer Anpassungserscheinung an Training, die Verchoshanskij (1988) als langfristig verzögerten Trainingseffekt bezeichnet. Danach kommt es während der konzentrierten Anwendung weniger Trainingsmittel in einem mehrwöchigen Belastungsblock zu einer allmählichen Zustandsverschlechterung des Athleten. Diese Abnahme der Leistungsfähigkeit sieht Verchoshanskij (1988) als auslösenden Faktor für eine anschließende langsam sich entwickelnde Verbesserung der Leistungsfähigkeit an. Eine ähnliche Anpassungsdynamik zeigt auch das LeiPot-Modell. Ein Unterschied ist allerdings darin zu sehen, dass bei der Simulation mittels LeiPot-Modell die Belastung unverändert fortgesetzt wird, während sich der Trainingsgewinn einstellt. Bei Verchoshanskij's langfristig verzögertem Trainingseffekt ist die Anpassung an einen Wechsel der Trainingsinhalte und damit der Belastung gebunden: Ein Trainingsblock führt zur Zustandsverschlechterung und durch die Anwendung eines neuen Belastungsblocks kommt es zur Anpassung und Leistungssteigerung. Dauer und Umfang des ersten Blocks bestimmen dabei die Dauer bis zum Erreichen des Leistungshöhepunktes sowie die Höhe des Leistungsgewinns. Während Verchoshanskij (1988) diese Regelmäßigkeiten von Belastungsgestaltung und Anpassung als zentrale Größe bei der Programmierung des sportlichen Leistungs-

zustandes ansieht, bezweifeln andere Autoren sogar die Existenz eines solchen langfristig verzögerten Trainingseffekts (vgl. Tschiene, 2006).

Ungeachtet dieser konträren Positionen und der geringfügigen Unterschiede zwischen LeiPot-Verhalten und langfristig verzögertem Trainingseffekt stellt sich die Frage nach geeigneten Einsatzmöglichkeiten des LeiPot-Modells in der Trainingspraxis. Im Gegensatz zum Banister-Modell, mit dem die unmittelbaren Ermüdungs- und Anpassungseffekte einer Einzelbelastung simuliert werden, simuliert das LeiPot-Modell eher die langfristige Zustandsveränderung, wie sie etwa auch von Verchoshanskij (1988) beschrieben wird. Kurzfristige ermüdungsbedingte Schwankungen werden dagegen nicht erfasst. Dieses zeigen auch Simulationsversuche mit fiktiven Daten: So kommt es nach einer einzelnen Belastung im LeiPot-Modell zu einer verzögerten Abnahme der Leistungsfähigkeit und anschließend zur Erholung (s. Abb. 4). Eine Superkompensation, wie sie aufgrund des klassischen Schemas erwartet werden kann, tritt dagegen nicht auf. Diese ist wie oben beschrieben an die Fortführung der Belastung gebunden.

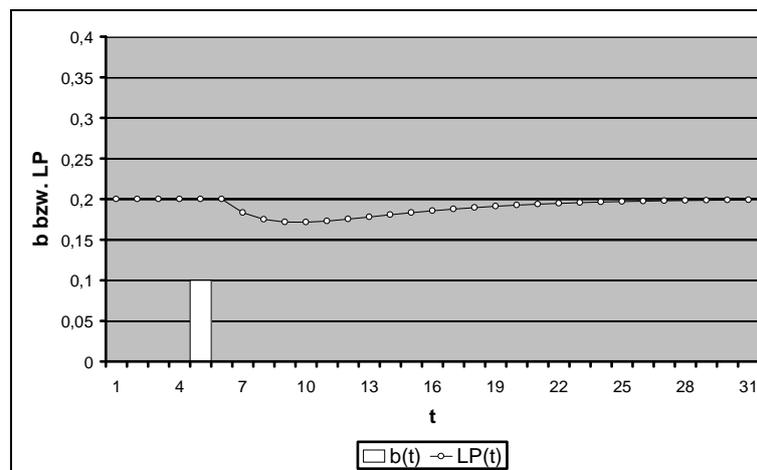


Abb. 4: Entwicklung des Leistungspotentials LP im LeiPot-Modell (Mester & Perl, 2000) für eine einzelne Belastung von 0.1. Nach der Belastung kommt es zur allmählichen Abnahme des LP und anschließend zur Erholung, nicht aber zu einer Superkompensation. Parameter und Startwerte wurden wie in Abb. 3 gewählt.

Auch die verzögert eintretende negative Belastungswirkung steht im Widerspruch zum angenommenen Ermüdungsprozess im Superkompensations-Modell und zu den Modellvorstellungen von Mader (1990). Danach kommt es schon unmittelbar beim Leistungsvollzug zur Strukturzerstörung, die als Ermüdung bzw. Abnahme der Leistungsfähigkeit anzusehen ist. Diese Vorstellung deckt sich mit der Erfahrung,

dass normalerweise am Ende eines Wettkampfes dieselbe Belastung nicht noch einmal bewältigt werden kann, dass die Leistungsfähigkeit also bereits belastungsbedingt abgenommen hat. Im LeiPot-Modell werden die auflaufenden Belastungen dagegen im sogenannten Belastungspotential zwischengespeichert, bevor sie dann *allmählich* die Leistungsfähigkeit verringern.

Kurzfristige Schwankungen der Leistungsfähigkeit, wie sie im Training auftreten können, lassen sich mit dem LeiPot-Modell demnach nur simulieren, wenn das Zeitintervall Δt bei der schrittweisen Berechnung der Modellzustände im Verhältnis zur Dauer der üblichen Belastungen sehr klein gewählt wird. Negative Effekte treten auch dann zwar verzögert auf, aber trotzdem zeigt sich die Ermüdung noch während oder zumindest kurz nach der Belastung in Form einer abnehmenden Leistungsfähigkeit. Nicht vereinbar mit der Realität bzw. den Vorstellungen zur Anpassung nach dem Superkompensations-Modell bleibt aber, dass es *während* der fortgesetzten Belastung zur Superkompensation kommt bzw. dass die Superkompensation bei einem Belastungsabbruch ausbleibt.

In der praktischen Anwendung ist eine kleine Schrittweite bei der Berechnung der Modellzustände allerdings mit einem hohen Rechenaufwand verbunden. Das macht sich insbesondere bei der Kalibrierung des Modells negativ bemerkbar, wenn der Simulationszeitraum sehr lang ist und z.B. mehrere Wochen oder gar eine ganze Trainingssaison umfasst.

Um in der Trainingspraxis sowohl die kurzfristigen Schwankungen der Leistungsfähigkeit als auch die langfristigen Zustandsveränderungen eines Sportlers zu simulieren, ließen sich also allenfalls das Banister-Modell und das LeiPot-Modell parallel einsetzen. Über das Banister-Modell könnten kurzfristige Ermüdungseffekte und über das LeiPot-Modell die sich langsam entwickelnden Anpassungen einschließlich möglicher Überlastungseffekte simuliert werden, die durch das Banister-Modell nicht darstellbar sind.

Der Einsatz von mehreren Modellen ist in der Praxis jedoch nicht nur umständlich, er vergrößert auch den Bedarf an Trainings- und Leistungsdaten bei der Kalibrierung der Modelle, da die Gesamtzahl der zu bestimmenden Parameter deutlich zunimmt. Dieses ist mit einem erhöhten Messaufwand verbunden, der möglicherweise auch die Athleten stark belastet. Zur Lösung dieses Problems erscheint es sinnvoller ein

einziges Modell zu entwickeln, das sich konkreter am realen Prozess der Adaptation orientiert, wie das Modell von Mader (1990), den Adaptationsprozess aber so stark vereinfacht, dass sich eine überschaubare und in der Praxis handhabbare Struktur ergibt (wie im Banister- bzw. LeiPot-Modell). Insgesamt müsste dieses Modell sowohl die kurzfristigen als auch die langfristigen Ermüdungs-, Anpassungs- und Überlastungseffekte simulieren können. Gegebenenfalls könnten ausgewählte Strukturelemente der vorgestellten Modelle in dieses neu zu entwickelnde Modell integriert werden.

3 ENTWICKLUNG EINES MODELLS ZUR SIMULATION VON BELASTUNG, ERMÜDUNG UND ANPASSUNG (SIMBEA-MODELL)

3.1 Vorbemerkungen zur Modellbildung

Im Folgenden wird die Struktur eines Modells zur **Simulation** von **Belastung**, **Ermüdung** und **Anpassung** im sportlichen Training hergeleitet (SimBEA). Der Anpassungsmechanismus des Modells und damit die inhaltliche Struktur des SimBEA-Modells orientiert sich am realen Prozess der Anpassung von physiologischen Systemen an Belastungen. Dieser Prozess wurde von Mader (1990) in einem komplexen Modell nachgebildet (vgl. 2.3). Einzelne Ansätze und Überlegungen des Mader-Modells dienen als Vorbild für die Modellbildung, wobei das SimBEA-Modell die realen Prozesse erheblich stärker vereinfacht als das im Proteinbiosynthese-Modell von Mader der Fall ist. Hintergrund ist das Anliegen, ein leicht handhabbares Modell für die tägliche Trainingspraxis zu schaffen.

Die mathematische Umsetzung des Modells orientiert sich dagegen am LeiPot-Modell. So erfolgt z.B. die Berechnung der Modellzustände schrittweise aus den vorhergehenden Zuständen, unter Berücksichtigung von inneren und äußeren Einwirkungen auf die Strukturelemente bzw. Potentiale des SimBEA-Modells. Nach Möglichkeit soll die Berechnung über relativ große Schrittweiten Δt im Bereich von einem Tag bzw. mehreren Stunden erfolgen, um den Rechenaufwand vertretbar gering zu halten.

Genau wie im LeiPot-Modell und im Banister-Modell wird eine antagonistische Modellstruktur gewählt, die dem Umstand Rechnung trägt, dass Trainingsbelastungen sowohl negative als auch positive Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit haben. Im Gegensatz zum LeiPot-Modell und zum Banister-Modell, in denen entweder beide Effekte verzögert oder beide Effekte sofort eintreten, dienen hier das klassische Modell der Superkompensation von Jakowlew (1977) und die Überlegungen von Mader (1990) als Vorbild für die Modellbildung: Nach diesen Ansätzen bewirkt Training eine unmittelbare Abnahme der Leistungsfähigkeit bzw. eine Strukturzerstörung. Nach Maders Modellvorstellungen sowie den Erkenntnissen von Jakowlew (1977) schafft dieser Leistungsrückgang bzw. die Strukturzerstörung

erst die Voraussetzungen für die anschließende, verzögert eintretende Anpassung und Superkompensation.

3.2 Grundstruktur des SimBEA-Modells

Die beschriebene Dynamik der Belastungswirkung wird folgendermaßen simuliert:

Die zum Zeitpunkt t absolvierte Trainingsbelastung $B(t)$ wirkt sich einerseits unmittelbar negativ auf die Leistungsfähigkeit aus. Unter Berücksichtigung eines Umrechnungsfaktors BF (**B**elastungs**F**aktor) reduziert sich damit die Leistungsfähigkeit im Intervall $[t, t + \Delta t]$ um den Betrag $BF * B(t)$. Zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ ergibt sich eine entsprechend verminderte Leistungsfähigkeit $L(t + \Delta t)$.

Andererseits wird dieselbe Belastung $B(t)$ in Anlehnung an das LeiPot-Modell in einem **AnpassungsPotential** AP zwischengespeichert, bevor es zur verzögerten Anpassungsreaktion und damit zum Anstieg der Leistungsfähigkeit kommt. Im Intervall $[t, t + \Delta t]$ wird das AP demnach um den Betrag $B(t)$ erhöht. Das AP kennzeichnet nicht nur die durch das Training geschaffenen Voraussetzungen zur Anpassung, sondern auch den Ermüdungszustand des Athleten, ähnlich der Ermüdungskomponente $Fat(t)$ im Zwei-Faktoren-Modell.

Der allmählich eintretende Effekt auf die Leistungsfähigkeit wird im SimBEA-Modell über die FlussRate APR vom **AnpassungsPotential** zur Leistungsfähigkeit modelliert: Die Höhe der Flussrate richtet sich nach dem aktuellen Bestand des Anpassungspotentials und einer spezifischen Verzögerung VA :

$$APR(t) = AP(t) / VA$$

Damit kennzeichnet VA den Anteil des Anpassungspotentials, der jeweils in einem Intervall der Länge Δt dem aktuellen AP verloren geht und dann zur Leistungssteigerung beiträgt. Bei dieser gewählten Form der Verzögerung findet der größte Teil der Anpassung nach einer einzelnen Belastung im ersten Intervall nach der Belastung statt. Für $VA = 2$ beträgt er z.B. 50 % der gesamten Anpassung. In den folgenden Intervallen finden dann nur noch 25 %, 12.5 %, 6.25 % usw. der gesamten Anpassung statt. Dieser Erholungs- und Anpassungsverlauf ähnelt dem angenommenen Ermüdungsabbau im Zwei-Faktoren-Modell und deckt sich mit den Anpassungsdynamiken, die Hettinger (1966) und Platonov (1999) beschreiben. So

konnte Hettinger (1966) im Krafttraining feststellen, dass 56 % der Kraftzunahme am ersten Tag nach der Belastung stattfinden, 39 % am zweiten und 5 % an den folgenden Tagen, wobei am siebten Tag nur noch 0.6 % der Kraftzunahme erfolgt (vgl. auch Abb. 5). Platonov (1999) stellt allgemein fest:

„Insgesamt verlaufen nach Belastungen unterschiedlicher Richtung, Größe und Dauer im ersten Drittel der Wiederherstellungsperiode etwa 55 bis 65 %, im zweiten Drittel 25-35 % und im dritten Drittel 5 bis 15 Prozent der Erholungsreaktionen“ (Platonov, 1999, S. 48).

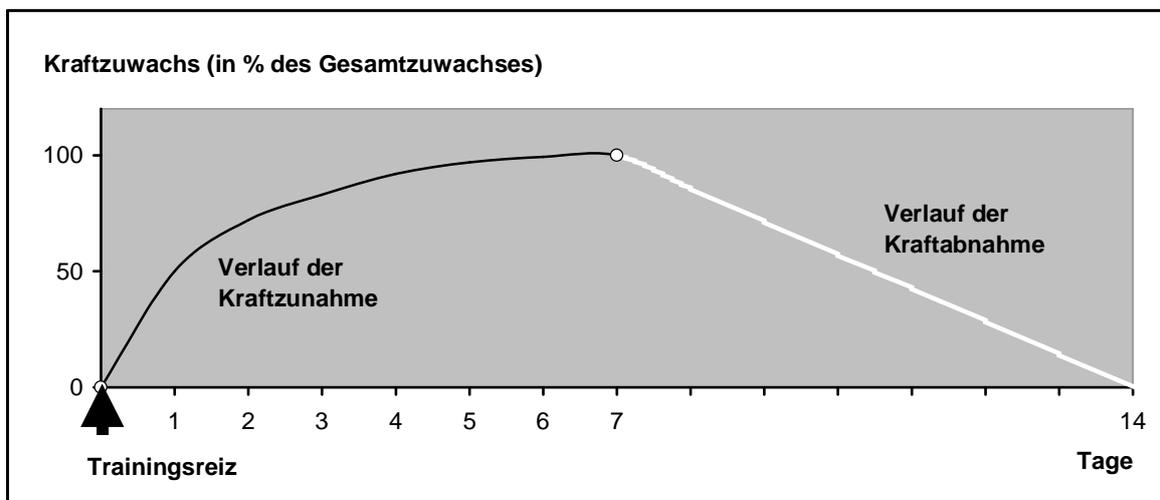


Abb. 5: Kraftzu- und abnahme nach einem einmaligen Training nach Weineck (1997, S. 264). Der durch den Trainingsreiz erreichte Kraftzuwachs wird als 100 % angesetzt.

Im Einzelfall gilt: Je kleiner die Verzögerung VA ist, umso schneller finden die Erholungs- und Anpassungsprozesse statt. VA charakterisiert damit die Erholungsfähigkeit des modellierten Athleten.

Für das Anpassungspotential ergibt sich zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ dann folgender Wert:

$$AP(t + \Delta t) = AP(t) + B(t) - APR(t)$$

Bevor die Flussrate APR auf die Leistungsfähigkeit wirkt, wird sie mit dem bereits angeführten Umrechnungsfaktor BF und darüber hinaus mit einem weiteren Faktor, dem AnpassungsFaktor AF modifiziert. Im Intervall $[t, t + \Delta t]$ erhöht sich die Leistungsfähigkeit L demnach um den Betrag $AF * BF * APR(t)$.

Während BF hier nur der Umrechnung von Belastungseinheiten in Einheiten der Leistungsfähigkeit dient, charakterisiert AF ganz entscheidend das Anpassungs-

verhalten des SimBEA-Modells an Belastungen: Je größer AF ist, umso größer ist der Gewinn an Leistungsfähigkeit in Folge einer konkreten Trainingsbelastung und damit die Anpassungsfähigkeit des modellierten Athleten.

Bei der gewählten Modellstruktur gilt bei einem konkreten Sportler für die Höhe der eintretenden Superkompensation nach einer Belastung dann Folgendes: Die Höhe der Superkompensation richtet sich (bei individuell feststehenden Parametern BF und AF) nach der Höhe der Belastung. Je höher eine Trainingsbelastung ist, desto größer ist die eintretende Leistungsverbesserung. Dieses Modellverhalten deckt sich mit Jakowlews (1977) und Platonovs (1999) Vorstellungen, nach denen mit der Höhe der Belastung die Ermüdung zunimmt und in der Folge die Superkompensation entsprechend größer ausfällt (vgl. Abb. 6).

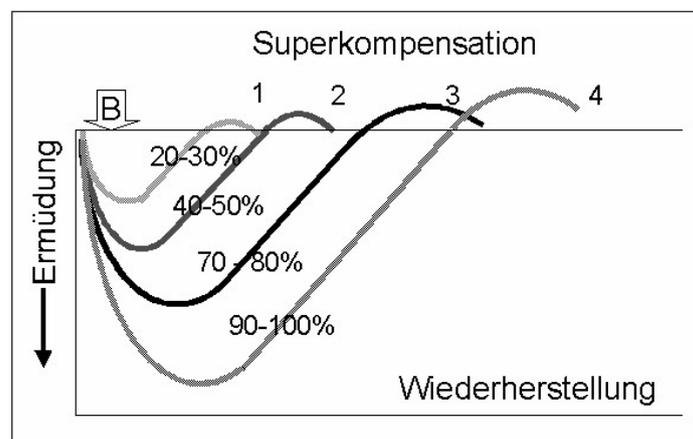


Abb. 6: Nachwirkungen von Trainingseinheiten mit unterschiedlich hoher Belastung nach Platonov (1999, S. 162). 1: geringe, 2: mittlere, 3: bedeutende, 4: große Belastung (B)

Aufgrund der bisherigen Überlegungen im Rahmen der Modellentwicklung ergibt sich damit vorläufig folgende Gleichung zur Berechnung der Leistungsfähigkeit:

$$L(t + \Delta t) = L(t) - BF * B(t) + AF * BF * APR(t)$$

3.3 Erweitertes SimBEA-Modell

Im Folgenden wird das SimBEA-Modell noch um zwei Komponenten erweitert:

Entsprechend Jakowlews (1977) und Maders (1990) Überlegungen löst im Modell die Abnahme der Leistungsfähigkeit die Prozesse der Regeneration und Anpassung aus. Ermüdung bzw. Strukturabbau oder -zerstörung durch Training schafft die Voraus-

setzungen dafür, dass nachfolgend vermehrt neue Strukturen aufgebaut werden können und sich die Leistungsfähigkeit erhöht.

Dieser Prozess von Strukturabbau und vermehrter Synthese der leistungssichernden Strukturen ist allerdings nicht beliebig auszuweiten. Denn nach Hollmann und Mader (2000) sind die Syntheseraten bei biologischen Anpassungsprozessen und damit die Fähigkeit zur Regeneration begrenzt (vgl. auch Jakowlew, 1977; Goldspink, 1992). Im SimBEA-Modell wird dies in Form einer Obergrenze APR_{max} für die Flussrate vom Anpassungspotential zur Leistungsfähigkeit berücksichtigt. Die Leistungsfähigkeit L berechnet sich dann folgendermaßen:

$$L(t + \Delta t) = L(t) - BF * B(t) + AF * BF * \min(APR(t), APR_{max})$$

Für Langzeitsimulationen lässt sich zusätzlich eine **AtrophieRate** in das SimBEA-Modell integrieren, die die Leistungsfähigkeit zu jedem Zeitpunkt t jeweils um den Betrag AR vermindert. Damit wird dem Phänomen Rechnung getragen, dass biologische Strukturen einem permanenten Um- und Abbau unterliegen und eine Mindestbeanspruchung zum Erhalt des Leistungsvermögens notwendig ist:

$$L(t + \Delta t) = L(t) - BF * B(t) + AF * BF * \min(APR(t), APR_{max}) - AR$$

Abb. 7 zeigt das Verhalten des SimBEA-Modells anhand einer Simulationsrechnung mit fiktiven Zahlen. Durch die Belastung kommt es zum unmittelbaren ermüdungsbedingten Rückgang der Leistungsfähigkeit. Anschließend zeigt das Modell einen Superkompensationseffekt, der sich allmählich zurückentwickelt.

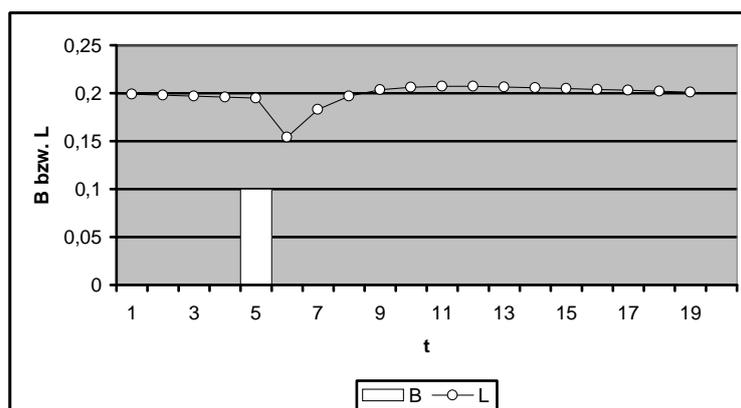


Abb. 7: Fiktives Beispiel für die Simulation der Leistungsfähigkeit als Reaktion auf eine Einzelbelastung mit dem SimBEA-Modell. Als Parameter und Startwerte wurden $VA = 2$, $AR = 0.001$, $AF = 1.2$, $L(0) = 0.2$, $AP(0) = 0$ gewählt. Die Anpassungsrate wurde im Beispiel nicht beschränkt. B: Belastung, L: Leistungsfähigkeit

3.4 Forschungsfrage

Mit dem SimBEA-Modell wurde in diesem Kapitel ein Modell vorgestellt, das den Prozess der Anpassung an sportliche Belastungen simulieren soll. Zusammenfassend sei festgestellt, dass die Struktur des Modells abgeleitet wurde aus Erkenntnissen zur Adaptation von physiologischen Systemen bzw. zu den ihnen zugrundeliegenden Prozessen. Da das SimBEA-Modell wie jedes Modell nur ein vereinfachtes Abbild des Modellgegenstandes ist, bleibt nachzuweisen, dass es trotz der erheblichen Vereinfachungen zur Simulation realer Trainings- bzw. Anpassungsprozesse geeignet ist.

Im folgenden empirischen Kapitel der Arbeit soll ein Ansatz zur Modellprüfung vorgestellt und eine erste Modellprüfung vorgenommen werden, beides am Beispiel des leistungsorientierten Ausdauertrainings. Im Falle einer erfolgreichen Validierung ließe sich das SimBEA-Modell dann im Sinne von Selujanov (1999) und Tschiene (1996, 1997) zur individuellen, modellbasierten Trainingsplanung einsetzen. Durch die auf den einzelnen Sportler ausgerichtete Simulation von Trainingswirkungen könnten dann optimale individuelle Trainingsbelastungen bestimmt und dadurch insbesondere Überlastung bzw. Unterforderung im Training vermieden werden.

4 EMPIRISCHE MODELLPRÜFUNG

Die empirische Prüfung des SimBEA-Modells erfolgt über zwei Längsschnittuntersuchungen am Einzelfall eines leistungsorientiert trainierenden Läufers und über eine trainingsbegleitende Kleingruppenuntersuchung mit D-Kader-Triathleten.

Als übergeordnetes Ziel der empirischen Modellprüfung gilt es, die Frage zu beantworten, ob das SimBEA-Modell reale Anpassungsprozesse an Trainingsbelastungen simulieren kann und somit im Trainingsalltag als Planungsinstrument einsetzbar ist. Die Prüfung dieses übergeordneten Kriteriums erfolgt über die Untersuchung verschiedener Aspekte der Reliabilität und Validität des Modells.

Bezüglich der Reliabilität ist zu prüfen, wie zuverlässig das SimBEA-Modell im Einzelfall kalibrierbar ist, ob also im Einzelfall Modellparameter und Modellverhalten zuverlässig bestimmbar sind. Hier ist auch zu prüfen, welchen Einfluss die Wahl des Intervalls für die iterative Simulation der Leistungsfähigkeit auf die Zuverlässigkeit der Simulation hat. Die Fragen der Reliabilität werden anhand der Einzelfalluntersuchungen geprüft.

Bezüglich der Validität ist dann zu prüfen, wie genau das SimBEA-Modell reale Leistungsentwicklungen simulieren kann. Hierbei geht es sowohl darum, reale Trainings- und Anpassungsprozesse über das Modell nachzubilden, als auch darum, die Prognosegüte des SimBEA-Modells nachzuweisen. Beide Aspekte der Validität werden über die Einzelfalluntersuchungen geprüft. Eine Validierung der Modellstruktur erfolgt über die Kleingruppenuntersuchung. Hierbei wird die Konstruktvalidität ausgesuchter Modellparameter des SimBEA-Modells geprüft.

4.1 Methode der empirischen Untersuchungen

4.1.1 Untersuchung 1 und 2 (Einzelfalluntersuchungen)

4.1.1.1 Versuchsplanung

Die erste Überprüfung des SimBEA-Modells erfolgt anhand von zwei Längsschnittuntersuchungen am Einzelfall. Einzelfalluntersuchungen sind als Forschungsmethode „immer dann indiziert, wenn man am Verlauf, an der Veränderung von

Merkmale oder Merkmalsgruppen einer einzelnen Person interessiert ist“ (Schlicht, 1994, S. 184). Diese Indikationen sind im vorliegenden Fall gegeben. Schließlich ist das SimBEA-Modell zur Simulation von *individuellen* Belastungs-, Ermüdungs- und Anpassungsprozessen vorgesehen. Und aus dieser Vorgabe folgt, dass auch die empirische Validierung des Modells nur an Einzelfällen erfolgen kann.

Für die praktische Trainingssteuerung ist die korrekte Simulation des Adaptationsprozesses von besonderer Bedeutung. Denn der vorausberechnete Verlauf wichtiger Leistungsparameter soll Schwachpunkte im geplanten Training aufzeigen können und helfen, das Training in diesen Bereichen zu optimieren. Zu prüfen ist also, ob der reale und der simulierte Verlauf der Leistungsfähigkeit übereinstimmen bzw. ob die Leistungsentwicklung richtig prognostiziert werden kann. Um auch die kurzfristigen, trainingsbedingten Leistungsschwankungen zu erfassen, müssen deshalb im Zuge eines Anpassungsvorganges sehr häufig reale Leistungsdaten ermittelt und den Modellwerten gegenübergestellt werden.

Die Untersuchungsdauer im Einzelfall 1 orientiert sich an der typischen Dauer eines Mesozyklus. Darunter ist in der Trainingslehre ein Abschnitt im Trainingsaufbau zu verstehen, in dem akzentuiert ausgewählte Leistungsvoraussetzungen entwickelt werden (z.B. Schnabel et al., 1994). Ein Mesozyklus umfasst ca. drei bis sechs Wochen. Die Belastungsplanung der Mesozyklen orientiert sich am Jahrestrainingsplan und beinhaltet häufig die konkrete Festlegung der Trainingsinhalte und Belastungsgrößen für diesen Trainingsabschnitt. Gerade hier ist ein potentielles Einsatzfeld für das SimBEA-Modell zur Trainingsoptimierung zu sehen. Um die Validität des Modells für diesen Einsatzzweck prüfen zu können, wird die Einzelfalluntersuchung 1 über sechs Wochen angelegt. Die Veränderungen der Leistungsfähigkeit werden dabei täglich erfasst.

Die Einzelfalluntersuchung 2 ist darauf ausgelegt, die Gültigkeit des Modells bezüglich langfristiger Simulationen der Leistungsentwicklung zu prüfen. Die Untersuchung umfasst einen Zeitraum von 68 Wochen, so dass mehrere Vorbereitungsphasen auf Wettkämpfe sowie Übergangsphasen eingeschlossen sind. Damit werden bei der Modellanpassung sowohl Abschnitte mit hoher als auch Phasen mit niedriger Belastung, also Phasen mit zunehmender und abnehmender Leistungsfähigkeit eingeschlossen. Da hier in erster Linie die langfristigen Effekte bezüglich der Leistungsfähigkeit erfasst werden sollen, erfolgen die Leistungs-

messungen in größeren Abständen in Abhängigkeit vom geplanten bzw. durchgeführten Training. Nach jeder Trainingsphase, die durch besondere Belastungsgestaltung oder Trainingsinhalte gekennzeichnet war, soll mindestens einmal die Leistungsfähigkeit erfasst werden.

Wegen der relativ langen Dauer beider Untersuchungen ergibt sich ein erheblicher Zeitaufwand für die Vp. Die Untersuchung wird deshalb als Selbstversuch durchgeführt.

4.1.1.2 Verfahren der Datenerhebung

Zur Validierung des SimBEA-Modells sind erstens die Höhe und Variation der Trainingsbelastung sowie zweitens die Veränderungen der Leistungsfähigkeit zu erheben. Folgende Messverfahren und Operationalisierungen werden für die Modellvariablen *Belastung* und *Leistung* verwendet:

Messung und Operationalisierung der Belastung (TI)

In Anlehnung an das Verfahren von Banister et al. (1986) lässt sich die Trainingsbelastung für Simulationszwecke als sogenannter Trainingsimpuls über das Produkt aus Trainingsdauer und Trainingsbeanspruchung beschreiben. Die Beanspruchung wird in dieser Untersuchung über das subjektiv erlebte Beanspruchungsempfinden erfasst. Die Einschätzung der Beanspruchung erfolgt anhand der 15-stufigen *rating of perceived exertion-scale* (RPE, Borg-Skala) von Borg (1985). Die erlebte körperliche Beanspruchung ist dazu unmittelbar nach dem Training zwischen „6 – sehr wenig“ und „20 – sehr stark“ zu bewerten:

Das Training hat mich körperlich beansprucht:

6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
sehr wenig														sehr stark

Bei der weiteren Berechnung der Gesamtbelastung einer Trainingseinheit (Trainingsimpuls TI) wird nun die Höhe der Beanspruchung (RPE; Wertebereich zwischen 6 und 20) ins Verhältnis zur maximal möglichen Beanspruchung gesetzt und dieser Wert mit der Belastungsdauer in Stunden multipliziert:

$$TI = (RPE - 6)/14 * \text{Belastungsdauer}$$

Eine mit 13 bewertete einstündige Trainingseinheit entspricht demnach dem Trainingsimpuls 0.5; eine mit 20 bewertete einstündige Beanspruchung ergibt den Wert 1.0.

Die so ermittelten Trainingsimpulswerte liefern die Belastungswerte für die Trainingsimulationen bei der Modellanpassung und Modellprüfung.

Messung der Leistung (HF_{AST})

Neben den Belastungsdaten müssen auch Leistungsdaten trainingsbegleitend erhoben werden. Dabei sind sowohl langfristige Veränderungen des Leistungsniveaus als auch kurzfristige ermüdungsbedingte Schwankungen der Leistungsfähigkeit zu erfassen. Die Datenerhebung darf jedoch den Trainingsprozess nicht zu stark beeinflussen und für den Sportler nicht zu belastend sein. Ein Testverfahren, das diesen Anforderungen gerecht wird, hat Hottenrott (1993) vorgestellt: Beim sogenannten Ausdauer-Standard-Test (AST) ist eine fünfminütige submaximale, standardisierte Belastung zu absolvieren. Dabei wird die Belastungsherzfrequenz als Beurteilungskriterium für den Zustand des Sportlers ermittelt.

Einerseits hängt die Herzfrequenz bei einer Standardbelastung vom Trainingszustand ab. Durch gesteigertes Training kommt es zu kardialen und vegetativen Anpassungen sowie zur Optimierung neuromuskulärer Steuerungsprozesse, wodurch langfristig die Belastungsherzfrequenz abnimmt. Umgekehrt steigt die Herzfrequenz bei einer Standardbelastung, wenn die Trainingsbelastung über längere Zeit reduziert wird (vgl. z.B. Neumann, Pfützner & Hottenrott, 2000).

Andererseits zeigt die Herzfrequenz bei submaximaler Standardbelastung auch kurzfristige Ermüdungsprozesse an: Generell muss der Organismus während einer sportlichen Belastung seine Ressourcen mobilisieren. Dafür wird die sympathische Aktivität gesteigert. U.a. nimmt dann die Herzfrequenz zu. Bei unzureichender Erholung stellt die gleiche Belastung einen erhöhten Systemstress dar, so dass sie nur noch im Alarmzustand zu bewältigen ist. Die sympathische Aktivität ist in diesem Fall höher als bei der gleichen Belastung im erholten Zustand. Entsprechend steigt auch die Herzfrequenz bei submaximaler Belastung im ermüdeten Zustand stärker an (vgl. Neumann et al., 2000). Aus der submaximalen Herzfrequenz, die in einem Ausdauer-Standard-Test (AST) ermittelt wird, kann damit auf die sympathische Aktivität und den Ermüdungszustand geschlossen werden: Eine erhöhte Herz-

frequenz kann so z.B. auch auf eine starke *muskuläre* Ermüdung hindeuten (Neumann et al., 1998).

Hottenrott kommt aufgrund seiner Untersuchung zu dem Ergebnis, dass „die Reliabilität für den ‚Ausdauer-Standard-Test‘ gegeben“ (Hottenrott, 1993, S. 83) ist. Als Maß für die Retest-Reliabilität gibt Hottenrott einen Rangkorrelationskoeffizienten für die mittlere HF von $r_s = .98$ ($p < .001$) an, wobei allerdings nur acht Test-Retest-Paare verrechnet wurden. Das Verfahren wird für diese Arbeit erweitert und modifiziert. Die Reliabilität dürfte das nicht beeinträchtigen: Als standardisierte Testverfahren werden unmittelbar nacheinander zwei 1200 m-Läufe durchgeführt. Die Laufgeschwindigkeit beträgt 12 km/h im ersten Lauf und 15 km/h im zweiten Lauf. Die Steuerung der Laufgeschwindigkeit erfolgt über Zwischenzeiten auf einer 400 m-Rundbahn. Während der Läufe registriert ein Pulscomputer die Herzfrequenz im 5 s-Intervall und speichert die Rundenzeiten auf Knopfdruck ab. Aus den Daten ergeben sich die mittleren Herzfrequenzen für beide Testläufe. Da die Herzfrequenz nach Beginn einer Belastung bzw. nach einer Belastungssteigerung eine gewisse Zeit benötigt, bis sie sich auf einem stabilen Niveau eingependelt hat, werden bei der Berechnung nur die Messwerte der zweiten und dritten Laufrunde jedes Tests berücksichtigt.

Um die beim Test auftretenden Abweichungen von der Sollgeschwindigkeit auszugleichen, wird mit Hilfe der gelaufenen Zeiten und der mittleren Herzfrequenzen durch lineare Inter- bzw. Extrapolation die Herzfrequenz bei 15 km/h berechnet. Das Vorgehen scheint insofern gerechtfertigt, als die Herzfrequenz im submaximalen Geschwindigkeitsbereich linear von der Geschwindigkeit abhängt. Die über diesen modifizierten Ausdauer-Standard-Test ermittelte Herzfrequenz geht in die Modellrechnungen als Leistungsvariable HF_{AST} ein.

4.1.1.3 Versuchsperson

Einzelfalluntersuchung 1. Während der Einzelfalluntersuchung 1 ist die Vp 26 Jahre alt (Gewicht 70 kg, Größe 1.82 m). Vom 15. bis 21. Lebensjahr hat sie leistungsorientiert Triathlon betrieben und war Mitglied im schleswig-holsteinischen D-Kader. In den darauffolgenden Jahren zwischen der Kaderzugehörigkeit und der Untersuchung nahm die Vp weiter an Wettkämpfen im Tri- und Duathlon sowie an mehreren Laufwettkämpfen teil. Das Training war in dieser Zeit allerdings weniger

systematisch aufgebaut. In den letzten zwei Monaten vor Untersuchungsbeginn machte die Vp nur zirka zwei bis drei etwa einstündige lockere Dauerläufe in der Woche. Mit den in der Untersuchung eingesetzten Testverfahren und Messinstrumenten ist die Vp bereits seit mehreren Jahren vertraut, so dass keine Probleme bei der praktischen Umsetzung der geplanten Untersuchung zu erwarten sind.

Einzelfalluntersuchung 2. Die Einzelfalluntersuchung 2 beginnt, als dieselbe Vp 29 Jahre alt ist. Das Körpergewicht beträgt 72 kg, die Körpergröße ist unverändert. Die Vp nimmt weiterhin an Laufwettkämpfen, vereinzelt auch an Triathlonwettbewerben teil.

4.1.1.4 Versuchsdurchführung

Einzelfalluntersuchung 1

Die Untersuchung erstreckt sich über einen Zeitraum von sechs Wochen. Vom 24.05.2001 bis 04.07.2001 wird jeden Morgen nach dem Aufstehen die Ruheherzfrequenz bestimmt und anschließend auf einem nahe gelegenen Sportplatz der modifizierte Ausdauer-Standard-Test (Hottenrott, 1993) durchgeführt, um die HF_{AST} als Kriterium für die aktuelle Leistungsfähigkeit zu bestimmen (vgl. 4.1.1.2). Alle im Untersuchungszeitraum durchgeführten Trainingseinheiten werden bzgl. der erlebten Beanspruchung eingeschätzt. Dabei wird die RPE-Skala unmittelbar nach der Belastung angekreuzt und die Belastungsdauer festgehalten. Hieraus ergibt sich der in die Modellierung eingehende Trainingsimpuls TI. Während sämtlicher Trainingseinheiten im Untersuchungszeitraum wird außerdem die HF per Pulsmesser im 5 s-Intervall gespeichert.

Einzelfalluntersuchung 2

Die zweite Untersuchung ist über einen längeren Zeitraum angelegt. Sie beginnt am 21.07.2004 und endet am 07.11.2005 und umfasst damit 68 Wochen. In dieser Zeit wird der modifizierte AST (vgl. 4.1.1.2) insgesamt 25 mal durchgeführt. Die Erfassung des Trainings und die Berechnung des Trainingsimpulses erfolgen nach demselben Vorgehen wie in Einzelfalluntersuchung 1.

4.1.1.5 Beschreibung des absolvierten Trainings

Einzelfalluntersuchung 1

Im Untersuchungszeitraum von 42 Tagen werden, abgesehen von den 42 Testläufen, noch insgesamt 26 weitere Trainingseinheiten absolviert: 19 Läufe, sechs Inlineskatingeinheiten und eine Radeinheit. Die Trainingsdauer beträgt insgesamt 47:43:15 h, entsprechend einer mittleren, täglichen Belastungsdauer von 1:04:35 h ($SD = 0:45:02$ h). Die mittlere Trainingsherzfrequenz liegt bei 129 Schlägen/min ($SD = 20$ Schläge/min). Für den täglichen Trainingsimpuls TI (vgl. 4.1.1.2) ergeben sich Werte zwischen 0.08 und 2.25 ($M = 0.63$; $SD = 0.55$). Abb. 8 zeigt die Dynamik der täglichen Trainingsbelastung im Untersuchungszeitraum.

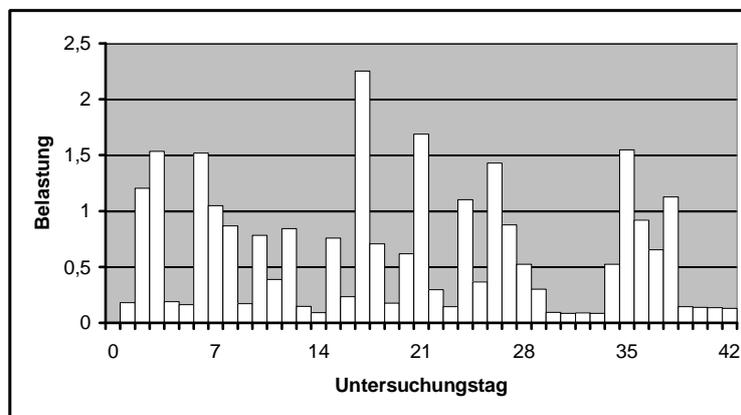


Abb. 8: Trainingsbelastung im Einzelfall 1 (Untersuchung 1). Dargestellt sind die täglichen Trainingsimpuls-Werte TI (zur Berechnung siehe 4.1.1.2)

Einzelfalluntersuchung 2

Während der 475 Untersuchungstage finden 465 Trainingseinheiten statt: 334 Laufseinheiten, 81 Radeinheiten, drei Sprinttriathlons, fünf Skilanglaufseinheiten, sechs Inlineskatingeinheiten und 36 weitere Trainingseinheiten mit allgemeinen Trainingsinhalten. Die Belastungsdauer beträgt insgesamt 464:26 h, die mittlere tägliche Trainingsdauer entspricht 0:37:11 h ($SD = 0:39:11$ h). Für den täglichen Trainingsimpuls TI (vgl.) ergeben sich Werte zwischen 0.00 und 4.64 ($M = 0.38$; $SD = 0.44$). Abb. 9 veranschaulicht die Belastungsdynamik im Untersuchungszeitraum.

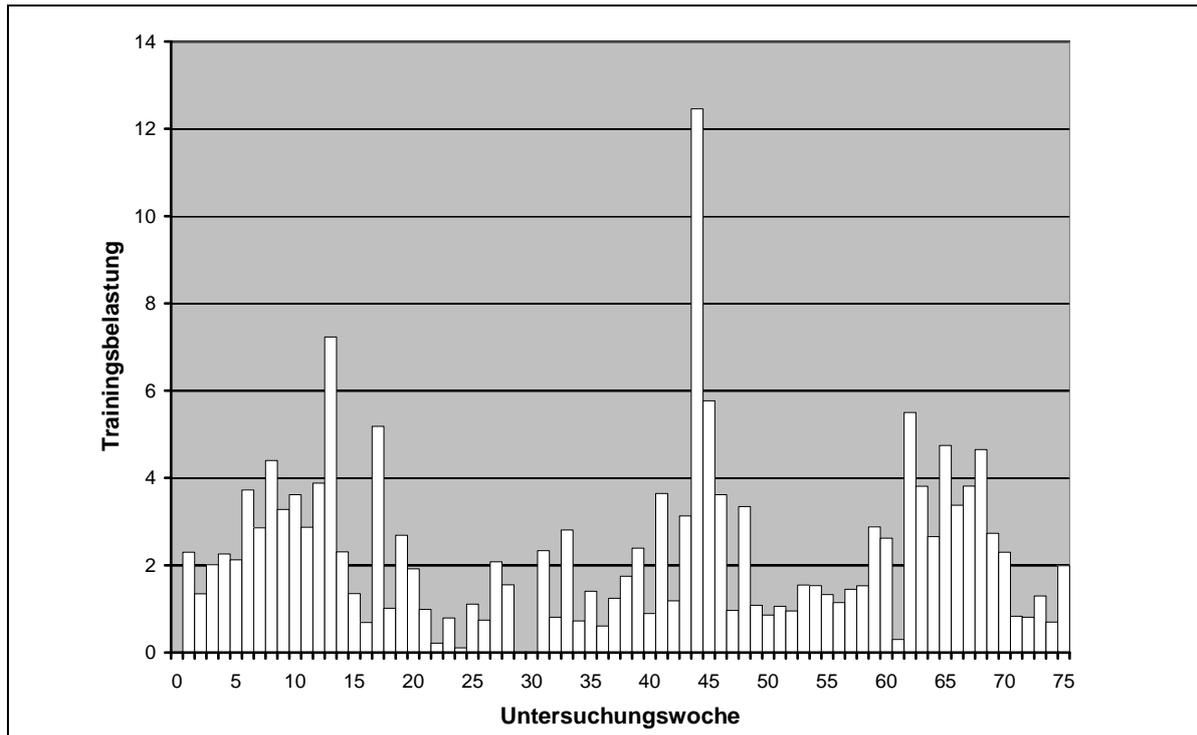


Abb. 9: Trainingsbelastung im Einzelfall 2 (Untersuchung 2). Dargestellt sind die wöchentlichen Trainingsimpuls-Werte TI (zur Berechnung siehe 4.1.1.2)

4.1.2 Untersuchung 3 (Kleingruppenuntersuchung)

4.1.2.1 Fragestellung und Versuchsplanung

Die Untersuchungen 1 und 2 dienen der Überprüfung des SimBEA-Modells am Einzelfall. Der Anpassungsprozess lässt sich mit diesem Untersuchungsdesign zwar gut erfassen, aufgrund des zeitlichen Aufwandes ist dieses Verfahren aber nur mit Einzelfällen durchführbar. Die Gültigkeit der gewonnenen Ergebnisse bleibt auf den Einzelfall beschränkt.

Zur weiteren Prüfung des SimBEA-Modells wird eine trainingsbegleitende Untersuchung mit D-Kader-Triathleten durchgeführt. Der Untersuchungszeitraum ist auf zwölf Tage eines gemeinsamen Trainingslagers begrenzt, so dass bei vertretbarem Aufwand Belastungs- und Leistungsdaten mehrerer Leistungssportler berücksichtigt werden können. Die Validierung des SimBEA-Modells anhand dieser Kleingruppenuntersuchung soll dann im Sinne der Konstruktvalidität erfolgen. Nach Bortz und Döring (1995) gilt ein Test als konstruktvalid, wenn theoriegeleitet oder empirisch begründet Hypothesen aufgestellt werden, die mit diesen Testwerten bestätigt

werden können. Dieses Validierungsverfahren wird auf das SimBEA-Modell und die Modellparameter übertragen: Über das Verfahren der simulationsbasierten Kalibrierung (s. 4.2) werden die Modellparameter für jede Person numerisch bestimmt. Parallel wird die Leistungsfähigkeit der Athleten erfasst. Aufgrund theoretischer Überlegungen werden dann Hypothesen zur Parameterausprägung und zur Leistungsfähigkeit der Athleten formuliert. Anschließend erfolgt die empirische Prüfung dieser Hypothesen. Eine Bestätigung der Hypothesen ist als gelungene Validierung der Modellüberlegungen zu werten.

4.1.2.2 Verfahren der Datenerhebung

Prozessbegleitende Messung von Belastung und Leistungsfähigkeit

Die trainingsbegleitende Datenerfassung ähnelt dem Vorgehen in der Einzelfalluntersuchung. Die Schwankungen der Leistungsfähigkeit werden über den modifizierten Ausdauer-Standard-Test (Hottenrott, 1993) ermittelt (vgl. 4.1.1.2). Die Laufgeschwindigkeiten richten sich nach den individuellen Leistungsfähigkeiten der Athleten, so dass beide Teststrecken wie in der Einzelfalluntersuchung im linearen Bereich der individuellen Herzfrequenz-Geschwindigkeits-Beziehung gelaufen werden. Der modifizierte AST liefert in jedem Einzelfall die HF_{AST} als operationalisierte Leistungswerte für die individuellen Modellanpassungen.

Die Modellvariable Trainingsbelastung wird wiederum über ein Produkt aus Trainingsdauer und Belastungsintensität ermittelt. Für die Belastungsintensität werden dabei Intensitätsfaktoren genutzt, die die Intensität des Trainings anhand der geplanten Trainings- bzw. Intensitätsbereiche beschreiben. Die Faktoren orientieren sich an den gängigen Prozentangaben für die Trainingsherzfrequenz im Grundlagenausdauerbereich 1 und 2 (GA1 bzw. GA2) sowie dem Bereich Wettkampfausdauer (WA) in Relation zur individuellen maximalen Herzfrequenz (z.B. Hottenrott & Zülch, 1995; Neumann et al., 2000). Als Intensitätsfaktoren werden 0.70 für GA1-, 0.80 für GA2- und 0.90 für WA-Trainingseinheiten verwendet.

Die in die Modellanpassung eingehende Trainingsbelastung TB ergibt sich damit folgendermaßen:

$$TB = \text{Intensitätsfaktor} * \text{Belastungsdauer}$$

Eine zweistündige GA2-Lauf-Belastung entspricht demnach dem Wert $TB = 1.6$.

Messung der Leistungsfähigkeit im Querschnitt

Die trainingsbegleitenden Ausdauer-Standard-Tests können zwar individuelle Veränderungen der Leistungsfähigkeit bzw. des Ermüdungsgrades messen. Da die absolute Höhe der Belastungsherzfrequenz von Person zu Person jedoch unterschiedlich ist und die Laufgeschwindigkeit im Test individuell festgelegt wird, eignet sich das Verfahren nicht für personenübergreifende Leistungsvergleiche. Für diese Vergleichszwecke werden ein vor dem Trainingslager durchgeführter Laktat-Stufentest im Laufen und ein Einzelzeitfahren während des Trainingslagers herangezogen.

Laktat-Stufentest: Der Laktat-Stufentest ist als Feldtest auf einer 400m Sandbahn angelegt. Die Stufenlänge beträgt 2000 m, das Anfangstempo wird individuell festgelegt und über Zeitvorgaben gesteuert. Die Geschwindigkeit nimmt von Stufe zu Stufe um ca. 1.5 km/h zu. Auf der letzten Runde jeder Stufe wird die durchschnittliche Herzfrequenz mittels Herzfrequenzmessgeräten der Fa. Polar ermittelt. Nach jeder Belastungsstufe erfolgt jeweils die Kapillarblutentnahme aus dem Ohrläppchen und die Laktatwertbestimmung mit den mobilen Messgeräten Lactate Pro der Fa. Arkray. Als Maß für die Ausdauerleistungsfähigkeit lässt sich anschließend durch Interpolation die Laufgeschwindigkeit bei einer Laktatkonzentration von 3 mmol/l (v_{La3}) berechnen.

Die über Stufentests ermittelte Geschwindigkeit bei einer fixen Laktatkonzentration ist ein gängiger und aussagekräftiger Parameter zur Messung der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit (Heck, 1990; Neumann et al., 2000). Da alle Tests in einem Durchgang durchgeführt werden, sind die Bedingungen für alle Athleten gleich, so dass trotz witterungsabhängiger Feldbedingungen die Vergleichbarkeit der Messergebnisse sichergestellt ist.

Einzelzeitfahren: Am zehnten Tag des Trainingslagers wird ein Einzelzeitfahren über 3.65 km durchgeführt. Das Rennen findet auf einer leicht ansteigenden Straße statt, die Höhendifferenz beträgt etwa 50 m. Belastungen über diese Distanz sind dem Bereich der Mittelzeitausdauer zuzuordnen. Sie stellen u.a. komplexe Anforderungen an den aeroben und anaeroben Stoffwechsel, an das Herz-Kreislauf System sowie an die disziplinspezifischen Kraftausdauerfähigkeiten dar (vgl. Neumann et al., 1998; Zintl & Einsenhut, 2001). Die Durchschnittsgeschwindigkeit im

Zeitfahren (v_{ZF}) wird neben der Stufentestleistung als weitere komplexe Leistungsvariable für die Modellvalidierung herangezogen.

4.1.2.3 Versuchspersonen

Durchgeführt wird die Untersuchung mit sieben Triathleten und -athletinnen des D-Kaders der Schleswig-Holsteinischen Triathlon Union bzw. der Landesauswahl für die Teilnahme an den Deutschen Duathlonmeisterschaften (eine Athletin). Die Athleten sind zwischen 14 und 20 Jahren alt und betreiben Triathlon oder Duathlon seit mehreren Jahren als Leistungssport. Weitere Personendaten enthält Tab. 2.

Tab. 2: Personendaten zu Untersuchung 3

Vp	1	2	3	4	5	6	7	<i>M</i>	<i>SD</i>
Geschlecht	w	m	m	m	m	m	m		
Alter [Jahre/Monate]	17 / 9	14 / 2	15 / 11	16 / 0	16 / 3	19 / 4	20 / 10	17 / 2	2 / 1
Körpergewicht [kg]	57	70	68	65	74	72	74	68.6	5.6
Größe [m]	1.72	1.75	1.78	1.75	1.88	1.82	1.85	1.79	0.05

4.1.2.4 Versuchsdurchführung

Die Untersuchung wird im Rahmen eines 12-tägigen Trainingslagers im März 2005 in Kroatien durchgeführt. Den Trainingsschwerpunkt stellt das Grundlagenausdauertraining mit dem Rad dar. Die beiden übrigen Disziplinen und allgemeines Athletiktraining sind ebenfalls regelmäßige Trainingsinhalte während dieser zwölf Tage.

An sechs Trainingstagen wird morgens der modifizierte Ausdauer-Standard-Test nach Hottenrott (1993) durchgeführt (vgl. 4.1.1.2). Die Athleten wählen ihr Lauftempo individuell so, dass die erste Teststrecke im Grundlagenausdauerbereich 1 und die zweite Teststrecke im Grundlagenausdauerbereich 2 gelaufen werden kann. Aufgrund der Trainingserfahrungen und des vor dem Trainingslager durchgeführten Laktat-Feldstufentests sind die Athleten in der Lage, diese Vorgaben umzusetzen.

Die absolvierte Trainingsbelastung wird von den Athleten protokolliert. Von wenigen Ausnahmen abgesehen, trainiert die Gruppe gemeinsam, so dass die Belastung der Athleten ähnlich ist. Eine Athletin muss nach drei Trainingstagen die Belastung wegen einsetzender Überforderungserscheinungen vorübergehend reduzieren, während ein älterer Athlet insgesamt und planmäßig höhere Trainingsumfänge absolviert.

4.1.2.5 Beschreibung des absolvierten Trainings

Die Athleten trainieren während des Trainingslagers weitgehend gemeinsam und nach demselben Trainingsplan. Nur die beiden älteren Sportler (Vp 6 und 7) absolvieren z.Zt. umfangreichere Trainingseinheiten. Vp 1 muss wegen Überlastungserscheinungen die Belastung am sechsten Tag reduzieren. Tab. 3 gibt einen Überblick über das Trainingsprogramm der Gruppe. Die sich im Einzelfall ergebenden Trainingsbelastungen sind in Tab. 4 zusammengefasst.

Tab. 3: Trainingsprogramm bei Untersuchung 3

Tag	Vp 1-5			Vp 7		
	Disziplin	Dauer	Trainingsziel/-inhalt	Disziplin	Dauer	Trainingsziel/-inhalt
1	R	1:00	GA1/KO	R	3:00	GA1
				S	0:30	Technik
2	L	0:50	Test, GA1, Technik	L	0:35	Test, GA1, Technik
	R	3:05	GA1	R	4:15	GA1
				S	0:45	Technik
3	S	1:00	Technik	S	1:00	Technik
	R	3:05	GA1, SA	R	5:00	GA1
	L	0:20	GA2 (KT)	L	0:10	GA2 (KT)
4	S	1:00	GA1/GA2			
	R	3:40	GA1	R	5:00	GA1
	L	0:40	GA1 (KT)	L	0:45	GA1 (KT)
5	L	0:10	Test	L	0:10	Test
	S	0:30	KO	S	0:30	KO
				L	0:50	GA1
6	L	0:45	Test, Technik, GA1	L	0:50	Test, Technik, GA1
	R	3:50	GA1, KA2	R	3:30	GA1, KA2
7	S	1:20	GA1	S	1:20	GA1
	R	2:40	GA1/GA2	R	3:10	GA1
	L	0:35	GA2 (KT)	L	0:30	GA2 (KT)
8	R	5:05	GA1/KA1	R	8:00	GA1
9	L	0:30	Test, Technik	L	0:30	Test, Technik
	S	1:00	Technik, GA2	S	1:00	Technik, GA2
10	S	1:00	GA1	S	1:00	GA1
	R	2:20	GA1, GA2/WA	R	4:00	GA1, GA2/WA
	L	0:55	GA1	L	0:48	GA1
11	L	0:30	Test, GA2	L	0:30	Test, GA2
	S	1:00	GA1	S	1:00	GA1
	R	2:35	GA1	R	4:30	GA1
12	L	0:10	Test	L	0:10	Test
	S	1:00	Technik	S	1:00	Technik

Abkürzungen:
S: Schwimmen, R: Rad, L: Laufen, KT: Koppeltraining R und L, A: allgemeines Training, GA1 bzw. GA2: aerobe/aerob-anaerobe Grundlagenausdauer, KA1 bzw. KA2: aerobe/aerob-anaerobe Kraftausdauer, WA: Wettkampfausdauer, SA: Schnelligkeitsausdauer, KO: Kompensationstraining, Test: Ausdauer-Standard-Test

Anmerkung:
Vp 1 setzt am sechsten Tag mit dem Training aus; Vp 6 trainiert teilweise mit Vp 7 und teilweise mit den übrigen Athleten (siehe auch Tab. 4).

Tab. 4: Tägliche Trainingsbelastungen (TB_{mod}) zu Untersuchung 3 (zur Berechnung siehe 4.1.2.2 und 4.2.3.6)

Tag	Vp 1	Vp 2-5	Vp 6	Vp 7
1	0.46	0.46	1.23	1.23
2	1.67	1.67	2.16	2.16
3	1.74	1.74	2.39	2.39
4	2.16	2.16	2.28	2.28
5	0.26	0.26	0.26	0.85
6	0.00	2.06	1.93	1.93
7	1.98	1.98	1.50	2.01
8	2.04	2.04	3.20	3.20
9	0.75	0.75	0.75	0.75
10	2.06	2.06	2.60	2.71
11	1.67	1.67	2.33	2.33
12	0.47	0.47	0.47	0.47
M	1.27	1.44	1.76	1.86
SD	0.78	0.70	0.88	0.81

4.2 Methode der Modellanpassung und Parameterbestimmung

4.2.1 Problemstellung

Das SimBEA-Modell ist ein allgemeines Modell der Anpassung an Belastungen. „Allgemein“ bedeutet hier, dass das Modell in der vorgestellten Form den prinzipiellen Mechanismus der Anpassung abstrahiert, ohne die speziellen Besonderheiten der Anpassungsdynamik eines konkreten Systems oder Sportlers zu berücksichtigen. Für konkrete Simulationszwecke im Training oder im Rahmen der Modellprüfung an realen Trainingsdaten ist das Modell an den konkreten Sportler anzupassen. D.h. die Parameter sind so zu bestimmen, dass das allgemeine Modell in Verbindung mit den konkreten, also numerisch bestimmten Parametern, ein Abbild des modellierten Athleten darstellt. Diese Modellanpassung bzw. Modellkalibrierung kann grundsätzlich auf mehreren Wegen erfolgen.

Da die Modellstruktur des SimBEA-Modell sich von realen Prozessen der Adaptation ableitet, wäre es beispielsweise denkbar, aufgrund von einmaligen physiologischen, biochemischen oder ähnlichen Untersuchungen die Anpassung des Modells vorzunehmen. Grundsätzlich dürfte es möglich sein, auf diesem Wege zu konkreten Modellparametern zu kommen. Allerdings ist dies vermutlich mit einem erheblichen Untersuchungsaufwand verbunden. Zur Anpassung des SimBEA-Modells wird

deshalb ein Verfahren herangezogen, dass Perl und Mester (2001) zur Kalibrierung des LeiPot-Modells verwenden. Es nutzt Simulationsrechnungen auf Grundlage von realen Belastungsdaten und bekannten Leistungswerten zur Bestimmung geeigneter Parameterausprägungen. In diesem Falle kann die Modellanpassung auch trainingsbegleitend erfolgen, wenn während des Trainingsprozesses Belastungs- und Leistungsdaten ermittelt werden. Dieses Verfahren der simulationsbasierten Kalibrierung wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

4.2.2 Simulationsbasierte Kalibrierung

Im Mittelpunkt der simulationsbasierten Kalibrierung steht der Gedanke, die Parameter des Modells danach zu bestimmen, wie gut sie bei vorgegebenen Belastungs- und Leistungswerten für die Simulation dieses realen Leistungsverlaufes geeignet sind:

„Mit Hilfe einer entsprechenden Suchstrategie können diejenigen Modellparameter bestimmt werden, mit denen die simulierten Leistungsdaten am besten die gemessenen Leistungsdaten approximieren“ (Perl & Mester, 2001, S. 55).

Die simulationsbasierte Kalibrierung des LeiPot-Modells umfasst dementsprechend mehrere Schritte (vgl. Perl & Mester, 2001): Ausgehend von den vorliegenden Belastungsdaten wird für einen Startsatz von Parametern die Leistungsentwicklung simuliert. Die simulierten Werte werden dann mit den realen Werten verglichen und die erreichte Genauigkeit der Simulation bestimmt. Wenn die angestrebte Genauigkeit noch nicht erreicht ist, werden die Parameter modifiziert. Mit den modifizierten Parametern wird dann erneut die Leistungsentwicklung simuliert und mit den realen Leistungswerten verglichen. Dieser Optimierungsvorgang wiederholt sich so lange, bis die angestrebte Genauigkeit erreicht ist. Die Kalibrierungsumgebung der LeiPot-Software liefert nach diesem Prinzip den optimalen Parametersatz zu den gegebenen Trainingsdaten sowie den mittleren Fehler der Simulation.

Die Grundidee dieses Verfahrens wird zur Kalibrierung des SimBEA-Modells herangezogen. Das heißt nach einer festgelegten Suchstrategie wird der Parametersatz bestimmt, der die Simulation der Leistungsdaten mit der höchsten Genauigkeit ermöglicht. Da, anders als beim allgemeinen LeiPot-Metamodell (vgl. Mester & Perl, 2000), der konkrete Gegenstand der Modellbildung bekannt ist, ist es möglich, vorab

aufgrund theoretischer Überlegungen oder empirischer Befunde relativ enge Wertebereiche für die Parameteroptimierung festzulegen. Innerhalb dieser Wertebereiche werden die Parameter mit einer festzusetzenden Schrittweite variiert und für alle möglichen Kombinationen von Parametern die Simulationsgenauigkeit bestimmt. Auf diese Weise lässt sich innerhalb der vorgegebenen Wertebereiche und Schrittweiten der optimale Parametersatz ermitteln, der die realen Leistungswerte mit der höchsten Genauigkeit approximiert.

Als Maß für die Simulationsgenauigkeit wird bei der Kalibrierung die Intraclass-Korrelation zwischen den simulierten und realen Leistungswerten herangezogen:

„Der Intra Class Correlation Coefficient (ICC) als Zusammenhangsmaß mit Werten zwischen -1 und $+1$ ist dann zu verwenden, wenn die Übereinstimmung zweier Variablen nicht [...] nur bezüglich ihrer Richtung („je größer die eine, desto größer die andere“) gemessen werden soll, sondern auch bezüglich des mittleren Niveaus der beiden Variablen“ (Bühl & Zöfel, 2000, S. 330).

Die Intraclass-Korrelation erfasst also in einer einzigen Maßzahl, was die gängigeren Verfahren wie die Berechnung des mittleren Fehlers bzw. die Pearson-Korrelation der Messwertreihen in separaten Werten ausdrücken. Da sowohl die Übereinstimmung der Schwankungen als auch die absolute Übereinstimmung beider Wertereihen in den Koeffizienten einfließen, eignet sich die Intraclass-Korrelation in besonderem Maße dafür, die Genauigkeit der Simulation zu erfassen.

4.2.3 Wertebereiche, Schrittweiten und Startwerte

Im Folgenden werden die Wertebereiche für die einzelnen Modellparameter hergeleitet. Innerhalb dieser Bereiche sind dann bei der Kalibrierung des SimBEA-Modells die individuell optimalen Parameter zu suchen. Die Wertebereiche werden, von zwei Ausnahmen abgesehen, sowohl bei den Einzelfalluntersuchungen als auch bei der Gruppenuntersuchung angewendet: Da der Untersuchungszeitraum der Gruppenuntersuchung sehr kurz und damit die Zahl der Leistungsmessungen gering ist, wird hier bezüglich des Parameters AR (Atrophierate) auf eine individuelle Bestimmung der Werte im Rahmen der simulationsbasierten Kalibrierung verzichtet. Gleiches soll für den Parameter DF (disziplinspezifischer Faktor) gelten, auf den ebenfalls noch näher einzugehen ist.

4.2.3.1 Parameter BF

Parameter BF ist ein Faktor zur Umrechnung von Belastungsdaten in Leistungswerte. Er beschreibt als solcher, wie stark eine Trainingsbelastung (hier operationalisiert als TI, vgl. 4.1.1.2) die Leistungsfähigkeit reduziert (hier: HF_{AST} , vgl. 4.1.1.2). Nach Angaben von Hottenrott (1993) erhöhen hohe Trainingsbelastungen die Ruhe-Herzfrequenz am nächsten Tag um durchschnittlich 10 Schläge pro Minute (s. auch Israel, 1995). Ähnliche Werte sind auch bzgl. der Belastungsherzfrequenz bei submaximaler Belastung zu erwarten (vgl. Neumann et al. 1998; Neumann et al., 2000). Die höchste Belastung bei Einzelfalluntersuchung 1 beträgt $TI = 1.55$. Ein geeigneter Faktor zur Umrechnung dürfte demnach im Bereich zwischen Eins und Zehn liegen, so dass die größte Belastung einen kurzfristigen Anstieg der HF_{AST} zwischen 1.55 und 15.5 Schlägen pro Minute bewirkt. Als Schrittweite wird 1.0 gewählt.

4.2.3.2 Parameter AF

Parameter AF modelliert das Verhältnis der positiven zur negativen Wirkung einer Belastung: Die negative Wirkung entspricht dem Leistungsrückgang nach einer Belastung, die positive Wirkung dem Betrag, um den die Leistungsfähigkeit anschließend wieder zunimmt. Damit sich der Körper überhaupt von Belastungen erholen kann, muss dieser Wert mindestens Eins betragen. Nicht berücksichtigt ist dabei, dass trainingsabhängige Leistungsgewinne auch noch die von der Belastung unabhängige, regelmäßige Atrophie des Systems ausgleichen müssen. Demnach ist davon auszugehen, dass der positive Effekt des Trainings deutlich größer ist als der negative Effekt. Für die Parameterbestimmung wird deshalb ein relativ großer Bereich für AF zwischen Eins und Fünf angenommen. Als Schrittweite wird 0.2 gewählt.

4.2.3.3 Parameter VA

VA kennzeichnet die Verzögerung und damit die Geschwindigkeit der Erholungs- bzw. Anpassungsprozesse des Sportlers. Je größer VA, desto länger dauert die Erholung. Nach Angaben bei Weineck (1997) zur Dauer von Wiederherstellungsprozessen ist davon auszugehen, dass Erholungs- und Anpassungsvorgänge der Glykogenspeicher sowie von Enzymen und Strukturproteinen innerhalb

einer Zeitspanne von 12 bis 72 Stunden weitgehend beendet sind. Aufgrund dieser Angaben wird bei der Modellierung angenommen, dass innerhalb von einem halben und drei Tagen nach der Belastung mindestens 95 % der Erholung stattfinden. Für $t = 24$ h ergibt sich daraus eine Verzögerung VA in einem Bereich zwischen $VA = 1$ und $VA = 1.5$. Entsprechend liegen für $t = 8$ h bzw. $t = 4$ h die Wertebereiche von VA zwischen 1.1 und 3.5 bzw. 1.5 und 6.5. Bei einer Unterteilung dieser drei Bereiche in zehn Intervalle ergeben sich dann Schrittweiten von 0.05, 0.24 bzw. 0.5 für die Bestimmung von VA. Für andere Simulationsintervalle können die Werte entsprechend von der SimBEA-Software berechnet werden.

4.2.3.4 Parameter APR_{max}

Zur Bestimmung der maximalen Anpassungspotentialrate APR_{max} wird bei der Kalibrierung zunächst davon ausgegangen, dass die Anpassungspotentialraten APR die Obergrenze APR_{max} nicht überschreiten. Der größte bei der Simulation auftretende APR-Wert liefert dementsprechend den Ausgangswert APR_{Start} für die Bestimmung des optimalen Parametersatzes innerhalb der simulationsbasierten Kalibrierung. Berücksichtigt werden dabei jeweils die Werte 100 %, 90 %, 80 %, ... 10 % von APR_{Start} .

4.2.3.5 Parameter AR

Hollmann und Hettinger (1976, S. 407f) beschreiben den Einfluß absoluter Bettruhe auf verschiedene Parameter des Atmungs- und Herz-Kreislaufsystems (s. auch Hollmann und Hettinger, 2000). Nach neuntägiger Bettruhe stieg die durchschnittliche Herzfrequenz von drei Sportlern bei einer standardisierten Ergometerbelastung (3 min, 190 W) um durchschnittlich 26 Schläge pro Minute an. Das entspricht einer mittleren täglichen Zunahme der Belastungsherzfrequenz von etwas weniger als drei Schlägen pro Minute.

Der Rückgang der körperlichen Leistungsfähigkeit bei Bettruhe ist nach Hollmann und Hettinger (2000) in erster Linie auf eine reduzierte Proteinsynthese zurückzuführen und nicht auf einen gesteigerten Abbau von Proteinen. Damit kann der von Hollmann und Hettinger (1976) beschriebene Leistungsrückgang näherungsweise als normale Abbaurate des betreffenden Systems angesehen werden. Unter normalen Bedingungen kommt es im System dann durch die höhere Alltags-

belastung oder durch Trainingsbelastungen zu mehr oder weniger gesteigerten Proteinsyntheseraten. Der Abbau wird dadurch verlangsamt, ausgeglichen oder übertroffen, so dass die Leistungsfähigkeit entsprechend langsamer abfällt, konstant bleibt oder zunimmt.

Die Alltagsbelastung wird im SimBEA-Modell der Einfachheit halber nicht direkt als Modellvariable berücksichtigt. Statt dessen wird von einer durchschnittlichen Alltagsbelastung ausgegangen, die im Modell einen Teil der permanent stattfindenden, realen Abbauvorgänge durch entsprechende Syntheseprozesse ausgleicht. Deshalb kann die Atrophierate im System etwas niedriger gewählt werden als es der Realität entsprechen würde: Da die außerhalb des Trainings auf das System einwirkende durchschnittliche Alltagsbelastung normalerweise höher als bei Bettruhe ausfallen dürfte, ist davon auszugehen, dass die tägliche Abnahme der Leistungsfähigkeit im Modell niedriger ausfällt als es der von Hollmann und Hettinger (1976) beschriebenen Zunahme der Belastungsherzfrequenz entsprechen würde. Der normale Anstieg der Belastungsherzfrequenz im Ausdauer-Standard-Test (HF_{AST}) sollte im Modell deshalb unter drei Schlägen pro Minute und Tag liegen. Bei einer Wahl von $\tau = 8$ h wäre dann von einem Anstieg der HF_{AST} von höchstens einem Schlag pro Minute und Intervall auszugehen. Für $\tau = 4$ h beträgt der Anstieg 0.33 Schläge pro Minute und Intervall. Entsprechend wird bei den Einzelfalluntersuchungen je nach Wahl von τ der Wertebereich für die Atrophierate AR zwischen Null und Drei, Null und Eins bzw. Null und 0.5 angenommen. Zur Bestimmung des optimalen Parameterwertes werden dementsprechend Schrittweiten von 0.3, 0.1 bzw. 0.05 angesetzt. Bei der Gruppenuntersuchung kann auf die individuelle Bestimmung verzichtet und ein fester Wert von $AR = 1$ (bei $\tau = 8$ h) gewählt werden.

4.2.3.6 Disziplin- bzw. sportartspezifischer Faktor DF

In beiden Einzelfalluntersuchungen wird der Trainingszustand über den Ausdauer-Standard-Test im Laufen gemessen. Trainingsschwerpunkt stellt ebenfalls Laufen dar. Dennoch werden insbesondere in Einzelfalluntersuchung 2 auch andere Disziplinen trainiert; in erster Linie handelt es sich dabei um Radbelastungen. Bei der Modellierung der Leistungsentwicklung ist die unterschiedliche Wirkung verschiedener Trainingsmittel zu berücksichtigen. Moroz und Houston (1987), Ruby et al.

(1996) sowie Millet et al. (2002) konnten nachweisen, dass Transfereffekte zwischen Radtraining und der Leistungsfähigkeit im Laufen bestehen. Millet et al. (2002) modellieren die Leistungsentwicklung von Triathleten im Laufen. Dafür benutzen sie das Banister-Modell, wobei sie einmal die Radbelastungen und einmal die Laufbelastungen zur Leistungsberechnung heranziehen. Für die über die Radbelastung modellierte Leistungsfähigkeit zeigt sich ein schwächerer Zusammenhang mit der realen Laufleistung ($r = .56, p < .001$) als für die über die Laufbelastungen simulierte Leistungsfähigkeit ($r = .74, p < .001$). Millet et al. (2002) leiten daraus ab, dass Radtraining einen geringeren Effekt auf die Laufleistung haben muss als Lauftraining. Allgemein kommen die Autoren zu folgendem Schluß: „It suggests that cross-transfer, even using similar modes, cannot match the effects of mode-specific training“ (Millet et al., 2002, S. 61).

Auch bei den hier geplanten Untersuchungen zur Modellprüfung ist soweit zu erwarten, dass alle Trainingsbelastungen einen mehr oder weniger großen Effekt auf die im Laufen ermittelte HF_{AST} haben, und dass die Höhe dieses Effekts von der Spezifität des Trainingsmittels im Vergleich zum Laufen abhängt. Bei der Modellierung von Trainingsanpassungen wird dieser angenommene unterschiedliche Trainingseffekt durch einen disziplinspezifischen Faktor DF simuliert. Dieser Gewichtungsfaktor modifiziert die für die Trainingseinheiten berechneten Trainingsimpulswerte TI entsprechend der trainierten Disziplin bzw. den angewendeten Trainingsmitteln:

$$TI_{mod} = DF * TI$$

Für Laufen wird hier $DF = 1$ gesetzt. Der entsprechende Wert für das Radtraining wird bei der Kalibrierung des Modells im Bereich zwischen 0.3 und 0.7 mit der Schrittweite 0.1 ermittelt.

Wie bei den Einzelfalluntersuchungen werden auch in der Gruppenuntersuchung die Belastungswerte TB in Abhängigkeit von der jeweils trainierten Disziplin mit einem disziplinspezifischen Faktor DF gewichtet. Entsprechend ergibt sich der modifizierte Belastungswert TB_{mod} :

$$TB_{mod} = DF * TB$$

Für Laufbelastungen wird wie bei den Einzelfalluntersuchungen $DF = 1$ gesetzt. Auf eine individuelle Bestimmung der Disziplinfaktoren für Rad- und Schwimmbelas-

tungen wird wegen der kurzen Untersuchungsdauer verzichtet und einheitlich ein mittlerer Disziplinfaktor von $DF = 0.5$ angenommen.

4.2.3.7 Startwerte

Die Leistungsfähigkeit $L(t + \Delta t)$ zu einem beliebigen Zeitpunkt $t + \Delta t$ wird im Modell jeweils aus dem vorherigen Modellzustand $L(t)$ berechnet. Den Ausgangswert $L(0)$ für die weitere Berechnung der Leistungsfähigkeit bildet der erste erhobene Leistungswert, d.h. der erste über den Ausdauer-Standard-Test ermittelte Wert HF_{AST} . Bezüglich des Anpassungspotentials AP wird auf eine empirische Bestimmung oder auf eine simulationsbasierte Kalibrierung verzichtet. Dadurch lässt sich einerseits der Rechenaufwand und andererseits der Datenbedarf bei der Kalibrierung reduzieren. Da die empirischen Untersuchungen jeweils nach zwei trainingfreien Tagen beginnen und sich das Anpassungspotential in dieser Zeit weitgehend entleert haben dürfte, wird für das Anpassungspotential deshalb der Einfachheit halber ein Startwert von $AP = 0$ angenommen.

4.2.4 Untersuchungsspezifische Modellanpassung

Der hier gewählte Ansatz der empirischen Modellverifikation macht eine spezielle Modellanpassung notwendig: Die Leistungswerte werden wie beschrieben mittels Ausdauer-Standard-Test erhoben (vgl. 4.1.1.2 und 4.1.2.2). Eine hohe im Test gemessene Herzfrequenz HF_{AST} entspricht einer niedrigen Leistungsfähigkeit. Umgekehrt ist eine niedrige HF_{AST} als hohe Leistungsfähigkeit zu werten. Der negative Effekt einer Belastung, der normalerweise die Leistungsfähigkeit L im Modell reduziert, muss demnach unter diesen Bedingungen den Wert für L erhöhen. Für die Atrophierate AR gilt entsprechendes. Umgekehrt muss die positive Trainingsanpassung entgegen der normalen Modellgleichung den Wert für L reduzieren. Aus diesem Grund werden in der Modellgleichung außer $L(t)$ alle übrigen Summanden bei der Berechnung von $L(t + \Delta t)$ mit -1 multipliziert, die Vorzeichen also „umgekehrt“. Die Berechnung von $L(t + \Delta t)$ folgt im Falle der empirischen Modellverifikation somit der modifizierten Gleichung:

$$L(t + \Delta t) = L(t) + BF * B(t) - AF * BF * \min(APR(t), APR_{max}) + AR$$

4.2.5 Simulations- und Auswertungssoftware

Für die Simulationsrechnungen in dieser Arbeit wurde vom Verfasser eigens eine Simulationssoftware in der Programmiersprache Visual Basic for Applications auf Basis von Microsoft Excel 97 (© Microsoft Corp. 1997) entwickelt. Mit ihr lassen sich für gegebene Belastungs- und Leistungsdaten die Modellparameter über das beschriebene Verfahren der simulationsbasierten Kalibrierung bestimmen (vgl. 4.2.2). Berechnet werden die Intraclass-Korrelation (nach Bortz & Döring, 1995, S. 252) und der mittlere absolute und relative Simulationsfehler, d.h. die Mittelwerte der absoluten bzw. relativen Abweichungsquadrate aller Wertepaare. Darüber hinaus sind bei bekannten Parametern auch Prognoserechnungen für gegebene Belastungen möglich. Bei Prognoserechnungen lassen sich ebenfalls die Intraclass-Korrelation und der Simulationsfehler rechnerisch bestimmen, wenn reale Leistungswerte vorliegen. Die weiteren statistischen Berechnungen in dieser Arbeit, insbesondere die Signifikanztests, werden mit SPSS for Windows 9.0.0 (© SPSS Inc. 1999) durchgeführt.

4.3 Modellprüfung

4.3.1 Fragestellung 1: Bestimmung eines geeigneten Simulationsintervalls Δt

Beim SimBEA-Modell handelt es sich genau wie beim LeiPot-Modell um ein diskretes Modell, d.h. schrittweise werden die Modellzustände aus dem jeweils vorhergehenden Zustand berechnet. Für das LeiPot-Modell gilt: Unabhängig von der tatsächlichen Wahl des Simulationsintervalls Δt (bspw. kann also für Δt eine Woche, ein Tag, eine Stunde oder ein beliebig anderes Intervall gewählt werden), ist das Modell prinzipiell in der Lage, die Phänomene Superkompensation und Überlastung zu simulieren. Je nach Wahl von Δt erstrecken sich im Modell entsprechende Prozesse der Superkompensation oder des überlastungsbedingten Leistungsrückgangs dann über mehrere Wochen, Tage oder Stunden. Das Simulationsintervall Δt ist also entsprechend den praktischen Erfordernissen zu wählen. Im Trainingsalltag ist häufig die sportliche Leistungsfähigkeit an einem konkreten Trainings- oder Wettkampftag von Interesse. Für die tageweise Vorhersage der Leistungsfähigkeit ist deshalb der Wert $\Delta t = 1$ Tag oder ein kürzerer Zeitabschnitt zu wählen.

Da im SimBEA-Modell der Ermüdungseffekt des Trainings ohne Verzögerung eintritt, können tägliche ermüdungsabhängige Schwankungen der Leistungsfähigkeit auch bei der Wahl von $\Delta t = 1$ Tag simuliert werden. Beim LeiPot-Modell ist hierzu ein kleineres Intervall notwendig. Wird jedoch tatsächlich als Simulationsschrittweite $\Delta t = 1$ Tag gewählt, dann hat der genaue Zeitpunkt einer Trainingsbelastung keinen Einfluss auf den Trainingszustand am nächsten Tag: Unabhängig davon, ob morgens, mittags oder abends trainiert wird, sind im Modell Ermüdung und Anpassung am nächsten Tag gleich. In der Realität dürfte die Leistungsfähigkeit dagegen besser sein, wenn am Vortag morgens statt abends trainiert wird, da die Erholungszeit dann einen halben Tag länger ist.

Bei der Wahl $\Delta t = 1$ Tag ist somit eine potentielle Fehlerquelle bei der Simulation gegeben, wenn Trainingsbelastungen zu unterschiedlichen Zeiten über den Tag verteilt auftreten, wie es im Leistungssport üblich ist. Ein kleineres Intervall könnte diesen Fehler reduzieren und zu genaueren Simulationsergebnissen führen. Andererseits ist zu berücksichtigen, dass eine kleine Simulationsschrittweite einen erhöhten Rechenaufwand bedeutet. So kann eine kleine Schrittweite gerade bei mehrwöchigen Simulationen zu einem erheblichen Zeitbedarf bei der simulationsbasierten Kalibrierung des Modells führen.

Ziel dieser ersten Analyse ist es, den Einfluss unterschiedlicher Simulationsintervalle Δt auf die Genauigkeit der Modellanpassung zu ermitteln und eine geeignete Wahl für die weiteren Simulationen zu treffen.

4.3.1.1 Methode und Hypothese

Um ein geeignetes Simulationsintervall zu bestimmen und den Einfluss verschiedener Werte für Δt auf die Genauigkeit zu ermitteln, wird das SimBEA-Modell an allen erhobenen Datensätzen der Untersuchungen 1 bis 3 jeweils personenbezogen für $\Delta t = 1$ Tag, $\Delta t = 8$ h und $\Delta t = 4$ h kalibriert. Als Maß für die personenbezogene Übereinstimmung der simulierten Leistungswerte mit den realen Leistungswerten dient jeweils die Intraclass-Korrelation zwischen den realen und den simulierten Leistungswerten. Für die Simulationsintervalle $\Delta t = 1$ Tag, $\Delta t = 8$ h und $\Delta t = 4$ h wird dann der mittlere Grad der Übereinstimmung der simulierten Leistungswerte mit den realen Leistungswerten verglichen.

Hypothese 1:

Entsprechend der obigen Überlegungen wird erwartet, dass sich für kleinere Simulationsintervalle als $\Delta t = 1$ Tag eine höhere Übereinstimmung der simulierten Leistungswerte mit den realen Leistungswerten zeigt.

4.3.1.2 Statistische Verfahren und Hypothesen

Die statistische Prüfung erfolgt über eine univariate Varianzanalyse mit Messwiederholung, wobei die Variation des Simulationsintervalls Δt als Messwiederholungsfaktor bzw. Innersubjekteffekt in die Berechnung eingeht. Die zu testende Null- bzw. Alternativhypothese lautet:

H₀1: Die mittlere Genauigkeit der Simulation unterscheidet sich für die Simulationsintervalle $\Delta t = 1$ Tag, $\Delta t = 8$ h und $\Delta t = 4$ h nicht.

H₁1: Für die Simulationsintervalle $\Delta t = 1$ Tag, $\Delta t = 8$ h und $\Delta t = 4$ h zeigt sich ein Unterschied in der Simulationsgenauigkeit.

Bei der Hypothesenprüfung wird ein α -Niveau von $\alpha = .05$ angewendet. Liegt die ermittelte Irrtumswahrscheinlichkeit p unter diesem α -Wert, dann ist entsprechend der üblichen Vorgehensweise beim Testen von Hypothesen die Nullhypothese zu verwerfen. Die Alternativhypothese wird in diesem Fall angenommen, andernfalls ist die Nullhypothese beizubehalten (vgl. Bortz & Döring, 1995). Auch bei allen weiteren statistischen Tests und Hypothesenentscheidungen wird entsprechend vorgegangen.

4.3.1.3 Ergebnis

Für das Simulationsintervall $\Delta t = 1$ Tag beträgt der Mittelwert der Intraclass-Korrelationen aller neun Simulationen $M = .73$ ($SD = .14$). Für die kürzeren Intervalle $\Delta t = 8$ h und $\Delta t = 4$ h ergeben sich Mittelwerte von $M = .82$ ($SD = .13$) bzw. $M = .83$ ($SD = .11$).

Die Varianzanalyse liefert einen F -Wert von $F = 5.36$ ($df = (2, 7)$, $p < .05$). Bei dem gewählten α -Niveau von $\alpha = .05$ kann die Nullhypothese verworfen und die Alternativhypothese angenommen werden. Bei den Simulationsintervallen $\Delta t = 1$ Tag, $\Delta t = 8$ h und $\Delta t = 4$ h zeigt sich also ein Unterschied in der Simulationsgenauigkeit.

Paarweise vorgenommene Vergleiche ergeben weiterhin, dass sich die mittleren Simulationsgenauigkeiten für $\Delta t = 1$ Tag und $\Delta t = 8$ h sowie für $\Delta t = 1$ Tag und $\Delta t = 4$ h signifikant unterscheiden ($p < .05$). Beim Vergleich der mittleren Simulationsgenauigkeiten für $\Delta t = 8$ h und $\Delta t = 4$ h zeigt sich dagegen kein signifikanter Unterschied.

Damit bestätigen die Ergebnisse Hypothese 1: Für kleinere Simulationsintervalle als $\Delta t = 1$ Tag ist die Übereinstimmung zwischen realen und simulierten Leistungswerten größer.

4.3.1.4 Diskussion

Untersucht wurde der Einfluss der Länge des gewählten Simulationsintervalls auf die Genauigkeit der Simulation. Die Ergebnisse bestätigen, dass ein kleineres Intervall als $\Delta t = 1$ Tag zu einer höheren Übereinstimmung von simulierten und realen Leistungswerten führt. Sowohl für $\Delta t = 4$ h als auch für $\Delta t = 8$ h ist die Simulationsgenauigkeit höher als bei der Berechnung in Schritten von einem Tag. Demnach hat nicht nur die Höhe der täglichen Trainingsbelastung, sondern auch der jeweilige Zeitpunkt der Belastung einen Einfluss auf die weitere Entwicklung der Leistungsfähigkeit. Denn durch kleinere Intervalle wird bei der Modellierung auch berücksichtigt, *wann* eine Trainingsbelastung am Tag absolviert wird. Dieser Zeitpunkt sollte demnach bei der Simulation durch ein kleineres Simulationsintervall berücksichtigt werden. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse erscheint es allerdings ausreichend, eine Dreiteilung des Tages vorzunehmen, Trainingsbelastungen einem der drei Intervalle zuzuordnen und die Entwicklung der Leistungsfähigkeit mit der Schrittweite von $\Delta t = 8$ h zu berechnen. Eine feinere Unterteilung bringt (zumindest bei den hier gegebenen Trainingsverhältnissen) offenbar keine weiteren Vorteile bezüglich der Exaktheit der Simulation, denn für $\Delta t = 4$ h und $\Delta t = 8$ h zeigt sich kein signifikanter Unterschied in der Simulationsgenauigkeit. Da ein kleineres Simulationsintervall zu höherem Rechenaufwand führt, wird bei den folgenden Analysen einheitlich die Schrittweite $\Delta t = 8$ h gewählt.

4.3.2 Fragestellung 2: Prüfung der Reliabilität des Kalibrierungsverfahrens

Um das SimBEA-Modell in der Trainingspraxis beispielsweise für Planungs- oder Analysezwecke einsetzen zu können, muss es an realen Belastungs- und Leistungsdaten eines Athleten kalibriert werden. Die Grundidee der simulationsbasierten Kalibrierung des SimBEA-Modells wurde von Perl und Mester (2001) übernommen. Für das LeiPot-Modell konnten die Autoren nachweisen, dass das Verfahren dort zuverlässig die Modellparameter ermitteln kann. Perl und Mester gehen bei ihrem Nachweis folgendermaßen vor (vgl. Perl & Mester, 2001):

In einem ersten Schritt generieren sie ein künstliches Belastungsprofil und einen künstlichen Parametersatz für das LeiPot-Modell. Mit diesem ersten Modell kann nun zu den künstlichen Belastungsdaten das entsprechende Leistungsprofil berechnet werden. Für dieses Leistungsprofil ist somit der zugrundeliegende Anpassungsmechanismus bekannt. Im zweiten Schritt wird das LeiPot-Modell mittels simulationsbasierter Kalibrierung erneut an eben diesen Leistungs- und Belastungsdaten kalibriert. Dieses zweite LeiPot-Modell berechnet dabei wiederum die Leistungsentwicklung als Reaktion auf das ursprüngliche, künstlich generierte Belastungsprofil. Im dritten Schritt wird die Leistungsentwicklung des ersten Modells mit der des zweiten Modells verglichen, das an das erste angepasst wurde. Wenn beide Leistungsprofile nur geringfügig voneinander abweichen, ist dieses als Indiz dafür anzusehen, dass das Verfahren der simulationsbasierten Kalibrierung zuverlässig ist. Anders ausgedrückt: Wenn ein Anpassungsprozess dem LeiPot-Mechanismus folgt, kann das Verfahren der simulationsbasierten Kalibrierung genutzt werden, um das LeiPot-Modell anhand von Belastungs- und Leistungsdaten dieses Systems zu kalibrieren. Das so kalibrierte Modell zeigt dann ein sehr ähnliches Verhalten wie das ursprüngliche System.

Für das Kalibrierungsverfahren des SimBEA-Modells ist die Zuverlässigkeit des Kalibrierungsverfahrens ebenfalls zu zeigen. Denn nur wenn diese gegeben ist, sind auch zuverlässige Simulationen möglich.

4.3.2.1 Methode und Hypothesen

In Anlehnung an das Verfahren von Perl und Mester (2001) wird die Zuverlässigkeit des Kalibrierungsverfahrens des SimBEA-Modells bestimmt. Im Unterschied zum

Vorgehen von Perl und Mester (2001) wird jedoch anfangs kein künstlich generierter Parametersatz genutzt, sondern der Parametersatz, der sich aus der ersten simulationsbasierten Kalibrierung des SimBEA-Modells an den Daten der Einzelfalluntersuchung 1 ergibt (**Modell U1**).

In Anlehnung an das oben beschriebene Verfahren wird nun im zweiten Schritt das SimBEA-Modell erneut kalibriert: Eingangswerte für die Kalibrierung sind ein fiktives Belastungsprofil über vier Wochen und die zugehörige durch Modell U1 simulierte Leistungsentwicklung (28 Leistungswerte). Das Belastungsprofil wird in Anlehnung an ein systematisches Trainingskonzept von Sleamaker (1996) erstellt. Die Gesamtbelastung von 15 Belastungseinheiten entspricht dabei der durchschnittlichen täglichen Belastung von Einzelfalluntersuchung 1 (vgl. Abb. 29 und 5.2). Mit dem so kalibrierten **Modell F** wird erneut die Leistungsentwicklung für dasselbe Belastungsprofil bestimmt. Im dritten Schritt werden beide Leistungsprofile verglichen, um zu prüfen, wie gut die Übereinstimmung bzw. der Simulationsfehler ist.

Folgende Hypothese wird aufgestellt:

Hypothese 2.1:

Für das fiktive Belastungsprofil zeigen Modell U1 und Modell F das gleiche Modellverhalten.

Um sicherzustellen, dass das Kalibrierungsverfahren auch in anderen Belastungsbereichen zuverlässig ist, wird das obige Verfahren für ein niedrigeres und ein höheres Belastungsprofil wiederholt: Dazu wird bei gleichem systematischen Aufbau die Gesamtbelastung auf 80 % (120 %) der ursprünglichen Belastung verringert (erhöht). Die Simulation mit Modell U1 liefert zu diesem Belastungsprofil wiederum Leistungswerte, an denen das SimBEA-Modell erneut kalibriert wird. Das so gewonnene **Modell F_{80%}** (bzw. **Modell F_{120%}**) liefert wiederum Leistungswerte, die erneut mit den ursprünglichen verglichen werden, also mit den Werten, die vorher Modell U1 für dasselbe Belastungsprofil erzeugt hatte.

Hypothese 2.2:

Für das verminderte (erhöhte) fiktive Belastungsprofil stimmt das Verhalten von Modell U1 und Modell F_{80%} (Modell F_{120%}) überein.

Die Modelle U1, F, F_{80%} und F_{120%} folgen alle dem gleichen Belastungs-Anpassungs-Mechanismus, wobei die Modelle F, F_{80%} und F_{120%} Approximationen von Modell U1 sind. Da die bei der Kalibrierung genutzten Leistungsdaten durch Modell U1 erzeugt wurden, existiert also ein Parametersatz, der das vorgegebene Modellverhalten exakt erzeugt.

Der Grad der Übereinstimmung der Leistungsentwicklung für das jeweilige Belastungsprofil drückt also aus, ob und in welchem Maß das vorgestellte Verfahren der Parameterbestimmung geeignet ist, aufgrund von gegebenen Belastungs- und Leistungsdaten das Modellverhalten zuverlässig zu bestimmen.

Um die Zuverlässigkeit des vorgestellten Verfahrens der simulationsbasierten Kalibrierung weiter zu prüfen, werden die Modelle F, F_{80%} und F_{120%} zur Simulation der Leistungsentwicklung für ein Belastungsprofil herangezogen, das durch einen Zufallsgenerator produziert wird. Die Zufallszahl-Funktion von Microsoft Excel erzeugt dazu für einen Zeitraum von vier Wochen jeweils tägliche Belastungen zwischen 0 und 2.

Hypothese 2.3:

Das Modellverhalten der Modelle F, F_{80%} und F_{120%} bezüglich eines zufälligen Belastungsprofils stimmt überein.

4.3.2.2 Statistische Verfahren und Hypothesen

Die Übereinstimmung von zwei oder auch mehreren Leistungsprofilen lässt sich statistisch über das Verfahren der Intraclass-Korrelation erfassen (vgl. 4.2.2; Bühl & Zöfel, 2000, S. 330). Entsprechend ergeben sich folgende statistische Hypothesen:

H₀2.1: Es besteht kein positiver Zusammenhang zwischen den von Modell U1 und Modell F erzeugten Leistungswerten für das fiktive Belastungsprofil ($r_{ICC} = 0$).

H₁2.1: Zwischen den von Modell U1 und Modell F für das fiktive Belastungsprofil erzeugten Leistungswerten besteht ein positiver Zusammenhang ($r_{ICC} > 0$).

H₀2.2: Es besteht kein positiver Zusammenhang zwischen den von Modell U1 und Modell F_{80%} (Modell F_{120%}) erzeugten Leistungswerten für das fiktive verminderte (erhöhte) Belastungsprofil ($r_{ICC} = 0$).

H₁2.2: Zwischen den von Modell U1 und Modell F_{80%} (Modell F_{120%}) erzeugten Leistungswerten besteht ein positiver Zusammenhang ($r_{ICC} > 0$).

H₀2.3: Es besteht kein positiver Zusammenhang zwischen den von Modell F, F_{80%} und F_{120%} erzeugten Leistungswerten für das zufällige Belastungsprofil ($r_{ICC} = 0$).

H₁2.3: Zwischen den von Modell F, F_{80%} und F_{120%} erzeugten Leistungswerten besteht ein positiver Zusammenhang ($r_{ICC} > 0$).

Ergänzend zur Intraclass-Korrelation wird aus Gründen der besseren Veranschaulichung jeweils auch der absolute und der relative Fehler der Modellanpassung bestimmt.

4.3.2.3 Ergebnisse

Hypothese 2.1:

Für den Zusammenhang der von Modell U1 und Modell F erzeugten Leistungswerte ergibt sich die Intraclass-Korrelation $r_{ICC} = 1.00$, $df = (40, 41, 0)$, $p < .001$. Der absolute Fehler beträgt 0.12 Schläge/min entsprechend einem relativen Fehler von 0.08 %. Bei dem gewählten α -Niveau von $\alpha = .05$ kann die Nullhypothese verworfen und die Alternativhypothese angenommen werden: Die simulierten Leistungswerte korrelieren positiv und stimmen nahezu überein. Damit bestätigt sich Hypothese 2.1: Modell U1 und Modell F zeigen das gleiche Modellverhalten für das fiktive Belastungsprofil.

Hypothese 2.2:

Für den Zusammenhang der von Modell U1 und Modell F_{80%} erzeugten Leistungswerte bezüglich des verminderten fiktiven Belastungsprofils ergibt sich die Intraclass-Korrelation $r_{ICC} = 1.00$, $df = (40, 41, 0)$, $p < .001$. Der absolute Fehler beträgt 0.15 Schläge/min entsprechend einem relativen Fehler von 0.10 %. Die Null-

hypothese kann also verworfen und die Alternativhypothese angenommen werden: Es zeigt sich ein positiver Zusammenhang der simulierten Leistungswerte für das verminderte Belastungsprofil.

Für den Zusammenhang der von Modell U1 und Modell $F_{120\%}$ erzeugten Leistungswerte in Bezug auf das erhöhte Belastungsprofil ergibt sich die Intraclass-Korrelation $r_{ICC} = 1.00$, $df = (40, 41, 0)$, $p < .001$. Der absolute Fehler beträgt 0.28 Schläge/min entsprechend einem relativen Fehler von 0.18 %. Auch hier fällt die Hypothesenentscheidung zugunsten der Alternativhypothese aus. Es besteht ein nahezu perfekter positiver Zusammenhang der von beiden Modellen simulierten Leistungswerte.

Hypothese 2.2 ist damit bestätigt: Modell U1 und Modell $F_{80\%}$ bzw. Modell $F_{120\%}$ zeigen dasselbe Modellverhalten für das verminderte bzw. erhöhte Belastungsprofil.

Hypothese 2.3:

Für die von Modell F, $F_{80\%}$ und $F_{120\%}$ simulierten Leistungswerte ergibt sich die Intraclass-Korrelation $r_{ICC} = .97$, $df = (26, 54, 0)$, $p < .001$. Bei dem gewählten α -Niveau von $\alpha = .05$ kann die Nullhypothese verworfen und die Alternativhypothese angenommen werden: Es besteht ein sehr hoher positiver Zusammenhang der simulierten Leistungswerte.

Auch die Hypothese 2.3 wird demnach bestätigt: Das Modellverhalten der Modelle F, $F_{80\%}$ und $F_{120\%}$ stimmt für ein zufälliges Belastungsprofil überein.

4.3.2.4 Diskussion

Alle berechneten Intraclass-Korrelationen ergeben einen sehr hohen oder nahezu perfekten positiven Zusammenhang. Damit stimmen die jeweils betrachteten Leistungswerte und damit ebenfalls die jeweiligen Modelle bezüglich ihres Verhaltens nahezu perfekt überein.

Die Modelle F, $F_{80\%}$ und $F_{120\%}$ wurden an vorgegebenen Belastungs- und Leistungsdaten kalibriert. Dabei variierte die Höhe der Belastung, während der zugrundeliegende Anpassungsmechanismus der Leistung in allen Fällen gleich war, nämlich entsprechend dem Mechanismus von Modell U1. Die sehr hohen Intraclass-Korrelationen zeigen: Das Modellverhalten von Modell U1 kann in allen drei Fällen

zuverlässig simuliert werden (Hypothesen 2.1 und 2.2), was bedeutet: In allen drei Belastungsbereichen lässt sich das SimBEA-Modell so kalibrieren, dass es den Anpassungsprozess zuverlässig simulieren kann.

Die von den Modellen F , $F_{80\%}$ und $F_{120\%}$ für das Zufalls-Belastungsprofil simulierten Leistungswerte korrelieren untereinander sehr hoch. D.h. die Modelle, die an unterschiedlichen Belastungen kalibriert wurden, zeigen auch bei einem beliebig anderen, nämlich einem zufallsgenerierten Belastungsprofil das gleiche Verhalten (Hypothese 2.3). Da die drei Modelle an unterschiedlichen Belastungen desselben Systems kalibriert wurden, hat die Belastungshöhe bei der Kalibrierung (zumindest im getesteten Belastungsbereich) offenbar keinen Einfluss auf das Verhalten des Modells bei einer anderen Belastung. Damit kann dem verwendeten Verfahren der simulationsbasierten Kalibrierung eine hohe Zuverlässigkeit bescheinigt werden.

4.3.3 Fragestellung 3: Prüfung der Reliabilität

4.3.3.1 Methode und Hypothese

Nachdem die Zuverlässigkeit des Kalibrierungsverfahrens als gegeben anzusehen ist (vgl. 4.3.2.4), ist nun die Reliabilität des SimBEA-Modells selbst zu prüfen. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, ob die Wahl der Leistungsdaten bei der Modellkalibrierung einen Einfluss auf das Verhalten des kalibrierten Modells hat. Zuverlässige Simulationen mit dem SimBEA-Modell sind nur möglich, wenn das Systemverhalten nicht von der Wahl einzelner Leistungsdaten bei der Kalibrierung abhängt. Wenn also aus ein und demselben Trainingsabschnitt unterschiedliche Leistungsdaten zur Kalibrierung genutzt werden, sollten die kalibrierten Modelle trotzdem dasselbe Modellverhalten zeigen und damit zu gleichen Simulationsergebnissen kommen.

Hypothese 3:

Die Auswahl der Leistungsdaten für die Kalibrierung (aus einem diskreten Belastungszeitraum) beeinflusst nicht das Modellverhalten.

4.3.3.2 Statistische Verfahren und Hypothesen

Für die Hypothesenprüfung werden die Daten der beiden Einzelfalluntersuchungen genutzt (Untersuchung 1 und 2) und folgendes Verfahren gewählt: Das SimBEA-Modell wird (getrennt für beide Datensätze) einmal an den Leistungsdaten für den ersten, dritten, fünften usw. Messzeitpunkt (**Modell U1_{ungerade}** bzw. **Modell U2_{ungerade}**) und ein weiteres Mal an dem zweiten, vierten, sechsten usw. Datenpunkt kalibriert (**Modell U1_{gerade}** bzw. **Modell U2_{gerade}**). Anschließend werden die an den jeweils ungeraden bzw. geraden Datenpunkten kalibrierten Modelle U1_{ungerade} und U1_{gerade} (resp. U2_{ungerade} und U2_{gerade}) genutzt, um die Leistungsdaten für alle Messzeitpunkte zu berechnen. Wie gut die Leistungsdaten übereinstimmen, wird mittels Intraclass-Korrelation geprüft.

Die Null- bzw. Alternativhypothese für die Daten der Einzelfalluntersuchung 1 lautet:

H₀3.1: Es besteht kein positiver Zusammenhang zwischen den von Modell U1_{ungerade} und Modell U1_{gerade} erzeugten Leistungswerten ($r_{ICC} = 0$).

H₁3.1: Zwischen den von Modell U1_{ungerade} und Modell U1_{gerade} erzeugten Leistungswerten besteht ein positiver Zusammenhang ($r_{ICC} > 0$).

Entsprechend lauten die Hypothesen für die Daten der Einzelfalluntersuchung 2:

H₀3.2: Es besteht kein positiver Zusammenhang zwischen den von Modell U2_{ungerade} und Modell U2_{gerade} erzeugten Leistungswerten ($r_{ICC} = 0$).

H₁3.2: Zwischen den von Modell U2_{ungerade} und Modell U2_{gerade} erzeugten Leistungswerten besteht ein positiver Zusammenhang ($r_{ICC} > 0$).

4.3.3.3 Ergebnisse

Abb. 10 und Abb. 11 zeigen den Grad der Übereinstimmung der von Modell U1_{ungerade} und Modell U1_{gerade} (Untersuchung 1) bzw. von Modell U2_{ungerade} und Modell U2_{gerade} (Untersuchung 2) berechneten Herzfrequenz-Werte. In beiden Fällen liegen die Werte nahe an der Identitätsgeraden, was für eine gute Übereinstimmung spricht. Das zeigen auch die Intraclass-Korrelationen: Der Zusammenhang der Leistungsdaten von Modell U1_{ungerade} und Modell U1_{gerade} beträgt $r_{ICC} = .92$, $df = (40, 41, 0)$, $p < .001$. Für Modell U2_{ungerade} und Modell U2_{gerade} ergibt sich ein Zusammenhang der simulierten Leistungswerte von $r_{ICC} = .93$, $df = (23, 24, 0)$,

$p < .001$. Damit können die Nullhypothesen verworfen und die Alternativhypothesen angenommen werden. Es besteht ein positiver Zusammenhang zwischen den simulierten Leistungswerten. Demnach wird Hypothese 3 bestätigt: Die Wahl der Leistungsdaten für die Kalibrierung beeinflusst nicht das Modellverhalten.

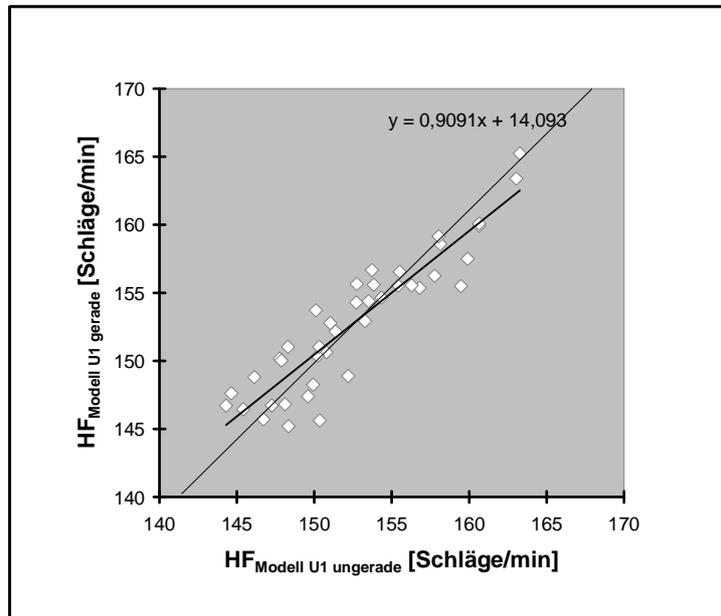


Abb. 10: Gegenüberstellung der von Modell U1_{ungerade} und Modell U1_{gerade} berechneten Herzfrequenz-Werte. Bei perfekter Übereinstimmung des Modellverhaltens müssten die von beiden Modellen simulierten Werte auf der Identitätslinie liegen.

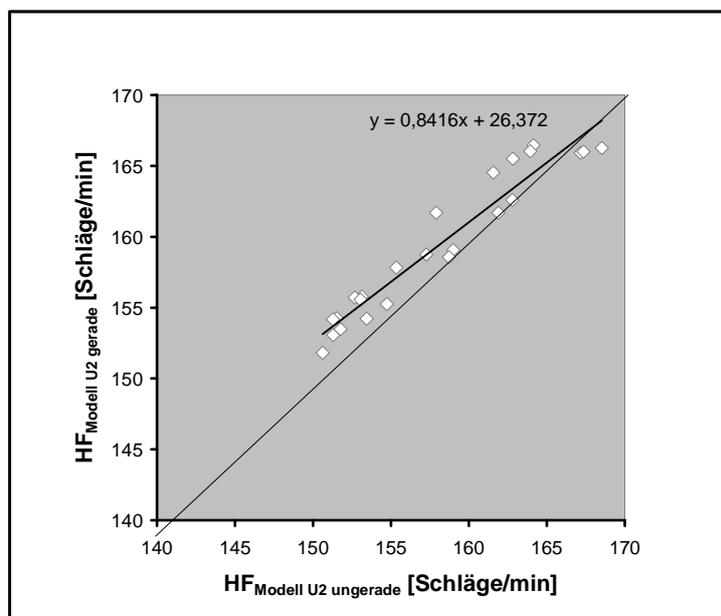


Abb. 11: Gegenüberstellung der von Modell U2_{ungerade} und Modell U2_{gerade} berechneten Herzfrequenz-Werte

4.3.3.4 Diskussion

Untersucht wurde der Einfluss, den die Datenauswahl bei der Kalibrierung auf das spätere Modellverhalten hat. Das Verhalten der untersuchten Modelle stimmt in hohem Masse überein, trotz unterschiedlicher Datenbasis (desselben Anpassungsprozesses) bei der Kalibrierung. Die Intraclass-Korrelationen zeigen eine hohe Übereinstimmung der berechneten Leistungswerte an und entsprechen beispielsweise den Anforderungen, die Rost (1999) an die Reliabilität von Leistungsmessungen stellt. Die Übereinstimmung des Modellverhaltens ergibt sich, obwohl die Modelle einmal an jedem ersten, dritten, fünften usw. der vorliegenden Leistungswerte, und einmal an jedem zweiten, vierten, sechsten usw. Leistungswert kalibriert wurden. Die unterschiedliche Datenbasis für die Kalibrierung zeigt damit, dass die Wahl der Leistungswerte offenbar nur einen geringen Einfluss auf das Simulationsergebnis hat. Das gilt sowohl für die sechswöchige Einzelfalluntersuchung 1, bei der der Leistungszustand täglich gemessen wurde, als auch für die Einzelfalluntersuchung 2 mit einer deutlich geringeren Messwertdichte von 25 Leistungsdaten in einem Trainings- und Simulationszeitraum von über einem Jahr. Damit kann dem SimBEA-Modell eine hohe Stabilität des Modellverhaltens hinsichtlich unterschiedlicher Ausgangsdaten bei der Kalibrierung bescheinigt werden.

4.3.4 Fragestellung 4: Prüfung der Validität

Ähnlich wie bei Tests und Messverfahren, so ist auch bei Modellen die Validität zu prüfen. Allgemein ist unter der Validität die Güte zu verstehen, mit der ein Verfahren das Merkmal misst, das es zu messen vorgibt (vgl. etwa Bortz & Döring, 1995). Grundsätzlich lassen sich verschiedene Formen der Validität unterscheiden. In Bezug auf Modelle sprechen Perl und Uthmann (1997) dann von einer positiv ausgefallenen Validierung, wenn der Grad der Übereinstimmung von Modell- und Realitäts-Verhalten zufriedenstellend ist. Dieser Validitätsbegriff ähnelt dem Begriff der Kriteriumsvalidität für Tests. Darunter versteht man die Korrelation eines Messwertes mit einem Außenkriterium, das das gleiche Merkmal misst (Bortz & Döring, 1995). Im Folgenden soll in diesem Sinne die Validität des SimBEA-Modells geprüft werden. Zu beantworten ist also die Frage, ob die simulierten Leistungswerte mit den realen Leistungswerten zufriedenstellend übereinstimmen.

4.3.4.1 Methode und Hypothese

Die Validität des SimBEA-Modells wird anhand der beiden Einzelfalluntersuchungen (Untersuchung 1 und 2) geprüft. Dazu erfolgt eine Kalibrierung des SimBEA-Modells an den empirischen Belastungs- und Leistungsdaten der Einzelfalluntersuchungen 1 und 2 (**Modell U1** und **Modell U2**). In Anlehnung an Perl und Uthmann (1997) stellt dann der Grad der Übereinstimmung der modellierten Leistungswerte mit den realen Werten ein Maß für die Validität dar. Folgende Hypothese ist zu prüfen:

Hypothese 4:

Das SimBEA-Modell kann in den Einzelfällen 1 und 2 den realen Verlauf der Leistungsfähigkeit als Reaktion auf die gegebene Trainingsbelastung simulieren.

4.3.4.2 Statistische Verfahren und Hypothesen

Bei der praktischen Validierung ergibt sich nun allerdings die Frage, wann die Übereinstimmung von Modell- und Realitätsverhalten im Sinne von Perl und Uthmann (1997) als zufriedenstellend anzusehen ist. Aber weder diese Autoren liefern entsprechende operationalisierte Bewertungskriterien, noch sind in der weiteren vorliegenden Literatur näher qualifizierende Angaben in Zusammenhang mit entsprechenden trainingswissenschaftlichen Belastungs- und Anpassungsmodellen zu finden. Bei der Validitätsprüfung wird deshalb auf die allgemeinen Angaben von Bortz und Döring (1995, S. 187) zurückgegriffen. Danach ist ein Validitätskoeffizient zwischen .40 und .60 als mittelmäßig zu bewerten. Größere Werte gelten dementsprechend als hoch.

Als Validitätskoeffizient wird wiederum die Intraclass-Korrelation herangezogen. Sie erfasst hier bezüglich der Leistungsfähigkeit den Grad der Übereinstimmung von Modell- und Realitäts-Verhalten. Folgende statistische Hypothesen sind auf dem gewählten α -Niveau von $\alpha = .05$ zu prüfen:

H₀4.1: Es besteht kein positiver Zusammenhang zwischen den von Modell U1 erzeugten Leistungswerten und den realen Leistungswerten ($r_{ICC} = 0$).

H₁4.1: Zwischen den von Modell U1 erzeugten Leistungswerten und den realen Leistungswerten besteht ein positiver Zusammenhang ($r_{ICC} > 0$).

H₀4.2:	Es besteht kein positiver Zusammenhang zwischen den von Modell U2 erzeugten Leistungswerten und den realen Leistungswerten ($r_{ICC} = 0$).
H₁4.2:	Zwischen den von Modell U2 erzeugten Leistungswerten und den realen Leistungswerten besteht ein positiver Zusammenhang ($r_{ICC} > 0$).

Aus Anschaulichkeitsgründen wird in beiden Fällen wieder ergänzend der absolute und der relative Fehler für die Simulation der realen Leistungsdaten berechnet.

4.3.4.3 Ergebnisse

Einzelfalluntersuchung 1:

Der Verlauf der gemessenen und simulierten HF_{AST}-Leistungswerte für Einzelfall 1 ist in Abb. 12 dargestellt. Abb. 13 zeigt den Grad der Übereinstimmung der Werte. Der absolute Fehler bei der Simulation der realen Leistungswerte beträgt 2.63 Schläge/min und der relative Fehler 1.73 %. Für die realen und die berechneten Leistungswerte ergibt sich eine Intraclass-Korrelation von $r_{ICC} = .86$, $df = (40, 41, 0)$, $p < .001$.

Die Nullhypothese kann demnach verworfen werden; entsprechend ist von der Gültigkeit der Alternativhypothese auszugehen. Für Einzelfall 1 besteht ein positiver Zusammenhang zwischen den realen und den berechneten Leistungswerten. Demnach kann das SimBEA-Modell den realen Verlauf der Leistungswerte simulieren, so dass Hypothese 4 durch Einzelfall 1 bestätigt wird.

Einzelfalluntersuchung 2:

Im Einzelfall 2 ergibt sich ein Simulationsfehler von 3.72 Schlägen/min bzw. 2.35 %. Abb. 14 veranschaulicht den Verlauf der gemessenen und der berechneten HF_{AST}-Werte, Abb. 15 zeigt die Abweichungen der Wertepaare von der Identitätslinie. Der Zusammenhang der realen Leistungsdaten mit den simulierten Daten beträgt $r_{ICC} = .65$, $df = (23, 24, 0)$, $p < .001$.

Auch im Einzelfall 2 kann die Nullhypothese verworfen und die Alternativhypothese angenommen werden. In diesem Fall besteht demnach desgleichen ein signifikanter positiver Zusammenhang zwischen den realen und den berechneten Leistungswerten. Bezüglich Einzelfall 2 bestätigt sich also ebenfalls, dass der reale Verlauf der Leistungswerte vom SimBEA-Modell simuliert werden kann (Hypothese 4).

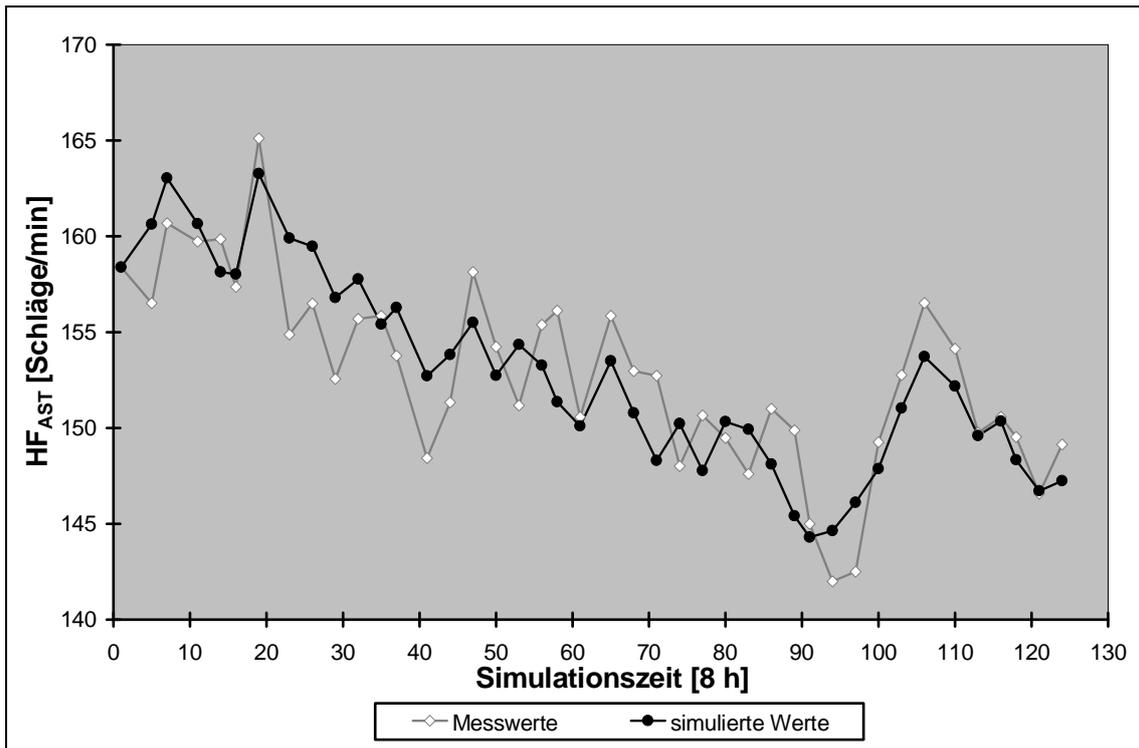


Abb. 12: Dynamik der mit dem Ausdauer-Standard-Test gemessenen und der simulierten Herzfrequenzwerte für Untersuchung 1. Um den Verlauf besser deutlich zu machen, wurden die Messwerte verbunden, obwohl es sich um diskret erhobene Daten handelt.

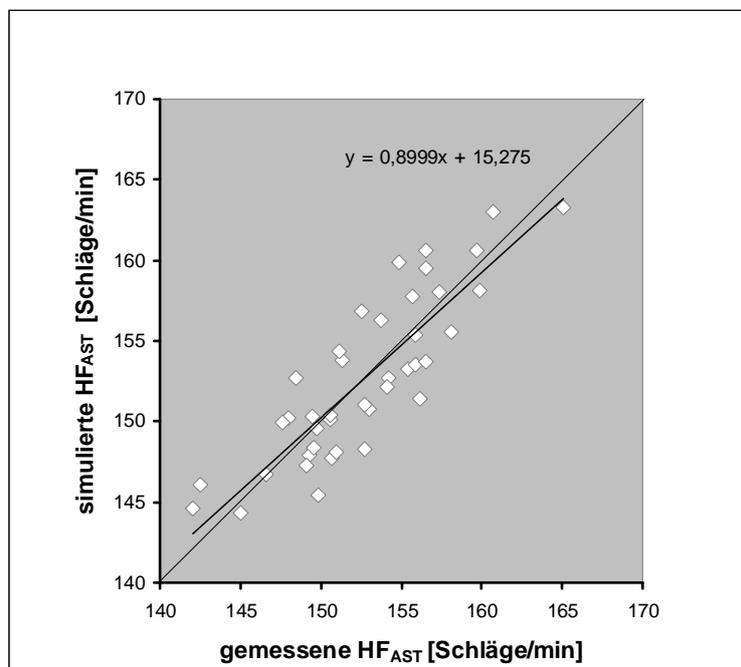


Abb. 13: Gegenüberstellung der in Untersuchung 1 mit dem Ausdauer-Standard-Test gemessenen Herzfrequenzen und der zugehörigen simulierten Herzfrequenz-Werte

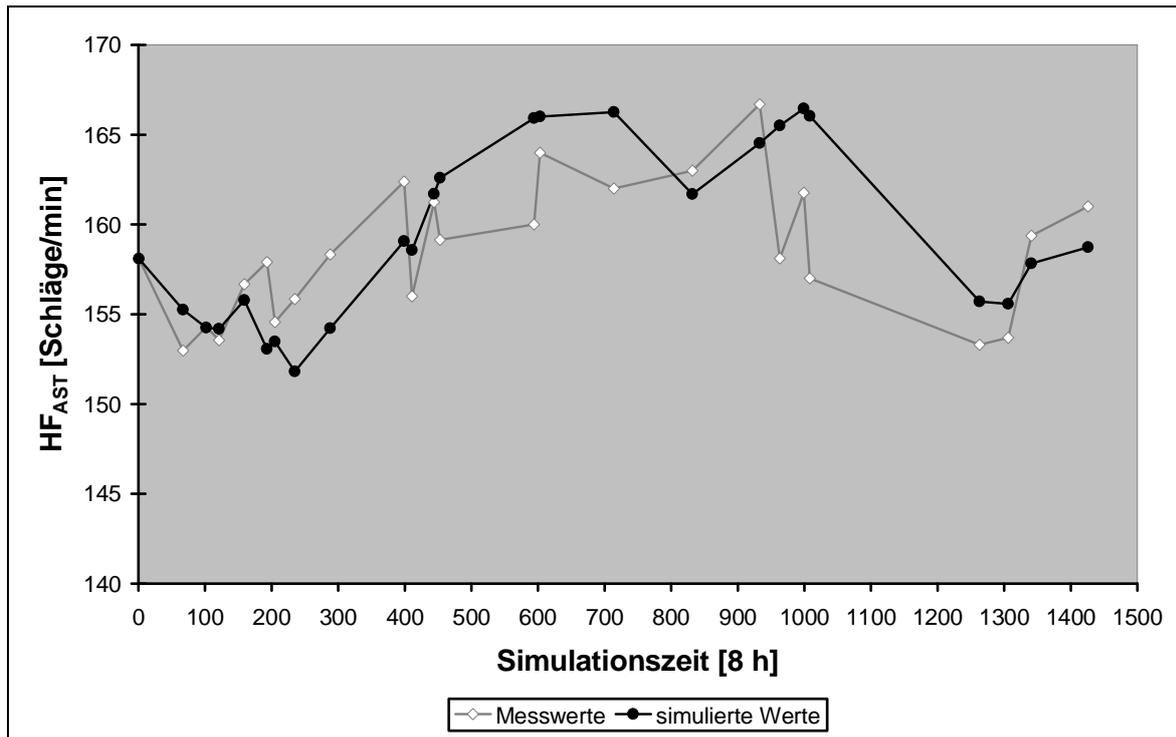


Abb. 14: Dynamik der mit dem Ausdauer-Standard-Test gemessenen und der simulierten Herzfrequenzwerte für Untersuchung 2 (s. Anm. zu Abb. 12)

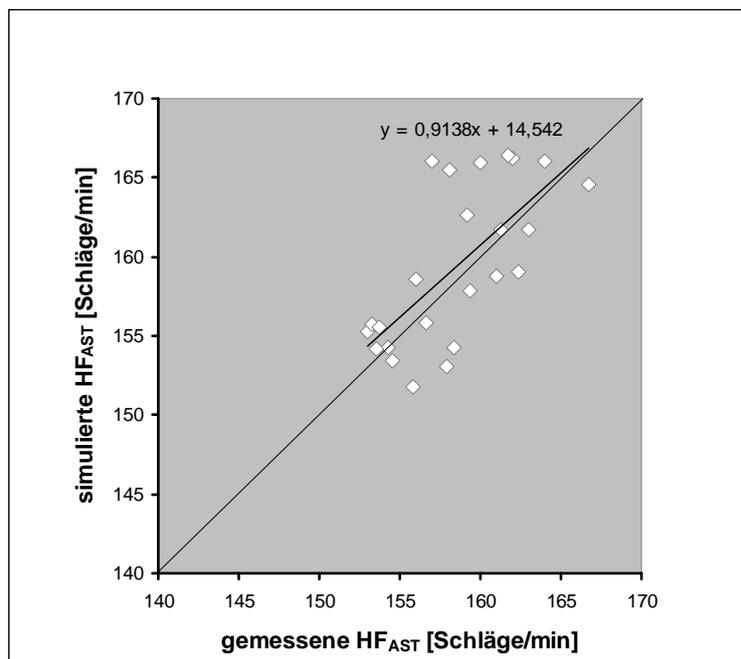


Abb. 15: Gegenüberstellung der in Untersuchung 2 mit dem Ausdauer-Standard-Test gemessenen Herzfrequenzen und der zugehörigen simulierten Herzfrequenz-Werte

4.3.4.4 Diskussion

Die Intraclass-Korrelationen zeigen in beiden Einzelfällen einen signifikanten positiven Zusammenhang der realen Leistungsdaten mit den berechneten Leistungsdaten. Nach den allgemeinen Bewertungskriterien für Validitätskoeffizienten von Bortz und Döring (1995) sind die Werte $r_{ICC} = .86$ bzw. $r_{ICC} = .65$ als hoch zu bewerten. Weineck (1997, S. 53) nennt Kriterien zur Beurteilung von Gütekoeffizienten für sportmotorische Tests. Sportmotorischen Tests sind innerhalb der Trainingssteuerung ähnliche Funktionen zuzuschreiben wie simulativen Trainingswirkungsmodellen. Im ersten Fall werden Aspekte der sportlichen Leistungsfähigkeit *gemessen*, im zweiten Fall wird die Leistungsfähigkeit *berechnet*. Beide Verfahren zur Informationsgewinnung sollen letztlich Entscheidungsprozesse in der praktischen Trainingssteuerung ermöglichen, so dass an beide Verfahrenswegen ähnliche Anforderungen hinsichtlich der Gültigkeit der Daten zu stellen sind. Werden die von Weineck (1997, S. 53) angeführten Beurteilungskriterien auf das Problem der Modellvalidierung übertragen, dann sind die vorliegenden Korrelationen folgendermaßen zu bewerten: Der Zusammenhang von $r_{ICC} = .86$ spricht für eine *ausgezeichnete* Validität des SimBEA-Modells, der Wert von $r_{ICC} = .65$ ist bei sehr komplexen Tests als *annehmbar* anzusehen. Zweifellos darf die Simulation der Ermüdungs- und Anpassungsprozesse als komplexes Verfahren im genannten Sinne anzusehen sein, zumal dann, wenn die Simulation derart lange Zeiträume umfasst. So ist auch die für Untersuchung 2 gefundene Validität als durchaus *annehmbar* zu bewerten.

Somit ist davon auszugehen, dass Modell- und Realitäts-Verhalten in hohem Maße (nach Bortz & Döring, 1995) bzw. *annehmbar* bis *ausgezeichnet* (nach Weineck, 1997) übereinstimmen, so dass das SimBEA-Modell im Sinne von Perl und Uthmann (1997) als *valide* bezeichnet werden darf.

Anzumerken ist darüberhinaus allerdings, dass **erstens** trotz einer als hoch zu bewertenden Validität deutliche Abweichungen zwischen Modellverhalten und realen Messwerten auftreten (s. dazu auch Abb. 12 bis Abb. 15) und dass **zweitens** die Übereinstimmung zwischen Modellverhalten und Realität für die Untersuchung 2 deutlich niedriger ausfällt als bei Untersuchung 1. Diese Punkte lassen sich folgendermaßen erklären:

Zu erstens: Das SimBEA-Modell ist, wie jedes andere Modell auch, ein vereinfachtes Abbild seines realen Vorbildes. Vereinfachungen wurden im vorliegenden Modell beispielsweise in folgenden Punkten vorgenommen (und die Auflistung ließe sich noch um einiges erweitern):

- Die zeitlichen Abläufe werden durch die diskrete Modellstruktur nicht exakt erfasst, sondern in den gewählten Intervallen von $\Delta t = 8h$ berechnet.
- Bei der Parameterbestimmung im Zuge der simulationsbasierten Kalibrierung sind durch die vorgegebenen Schrittweiten mögliche Parameterausprägungen vorgegeben. Selbst wenn die Modellstruktur mit der Realität übereinstimmen würde, ergäben sich dadurch potentielle Abweichungen von der Realität.
- Die Leistungsfähigkeit wird im SimBEA-Modell als monofaktoriell betrachtet: Die Belastung wirkt auf *eine* Leistungskomponente, die daraufhin in *einer* bestimmten Weise ermüdet und dann *ein* charakteristisches Anpassungsverhalten zeigt. In der Realität ist die sportliche Leistungsfähigkeit dagegen multifaktoriell bedingt, da viele Teilsysteme zusammenwirken und die Leistung absichern müssen. Dasselbe gilt für die im AST gemessene Belastungsherzfrequenz, die von vielen Faktoren abhängt. Dazu zählen z.B. das Herzvolumen, die periphere Kapillarisation oder der Flüssigkeitshaushalt, um nur einige zu nennen. Darüber hinaus erfasst der AST auch die Ermüdung des Athleten (Hottenrott, 1993; Neumann et al. 1998, Neumann et al., 2000), die sich wiederum aus vielen Komponenten zusammensetzt, nämlich aus der Ermüdung verschiedener Teilsysteme. Ein einzelnes SimBEA-Modell mit lediglich einer Leistungskomponente kann natürlich nicht alle Teilsysteme auf einen Schlag zutreffend abbilden. Eine genauere Modellierung müsste möglichst viele dieser Teilsysteme separat erfassen und schließlich in einem Gesamtmodell integrieren, was jedoch praktisch kaum realisierbar sein dürfte. Alternativ dazu könnte allerdings die Modellierung einiger ausgesuchter Leistungskomponenten ein praktikabler Kompromiss sein, der die Validität der Modellierung im Vergleich zu einem pauschaleren Modell erhöhen würde.

Jede Vereinfachung führt dazu, dass Modell und modelliertes System sich mehr oder weniger unterscheiden. Abweichungen im Modellverhalten sind damit normal. Ziel einer Modellbildung kann es demnach nicht sein, ein „richtiges“ Modell zu entwickeln,

sondern ein Modell, das für die vorgesehenen Zwecke geeignet ist (vgl. auch Perl & Uthmann, 1997). Bei den gegebenen Validitäten scheint eine taggenaue und numerisch exakte Berechnung nicht oder nur eingeschränkt möglich zu sein. Im vorliegenden Fall, in dem die Leistungsfähigkeit über den Ausdauer-Standard-Test erfasst wird, ist eine genaue Kenntnis der Herzfrequenzwerte darüberhinaus für trainingsplanerische Zwecke nicht notwendig, da über die HF_{AST} z.B. keine exakte Prognose der Wettkampfleistung möglich ist. Vielmehr sind hier die trainingsbedingten *Veränderungen* von Interesse. Und für eine Simulation der Entwicklungstendenz dürfte das SimBEA-Modell durchaus geeignet sein, so dass das Modell in der Trainingsanalyse Aufschluss darüber geben kann, ob Trainingsbelastungen positive oder negative Effekte haben und ob das Training noch zu optimieren ist.

Zu zweitens: Für die sechs Wochen umfassende Simulation zu Untersuchung 1 ergibt sich eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen realem und berechnetem Leistungsverhalten. Demnach kann die gewählte Modellstruktur in Verbindung mit einem individuell bestimmten Parametersatz den Anpassungsprozess gut erfassen. Über den erheblich längeren Simulationszeitraum von 68 Wochen bei Untersuchung 2 ist eine derart genaue Simulation offenbar nicht möglich. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Modellparameter sich im Laufe der Zeit verändern, also keine 100%ige zeitliche Stabilität der Parameter gegeben ist. Für praktische Simulationszwecke über lange Zeitspannen sollte deshalb die Kalibrierung des Modells regelmäßig überprüft werden, um gegebenenfalls durch eine Parameteranpassung die Simulationsgenauigkeit zu verbessern. Eine weitere mögliche Ursache für die geringere Simulationsgenauigkeit ist auch in der größeren Vielfalt der absolvierten Trainingsbelastungen bei Untersuchung 2 zu sehen. Während bei der ersten Untersuchung fast ausschließlich Laufbelastungen stattfanden, gab es in der zweiten Untersuchung auch sehr umfangreiche Radbelastungen. Das Training in den unterschiedlichen Disziplinen wurde zwar über einen disziplinspezifischen Faktor gewichtet und so in der Simulation berücksichtigt. Aber die geringere Simulationsgenauigkeit bei Untersuchung 2 könnte möglicherweise auch auf Unsicherheiten und Vereinfachungen bezüglich der Gewichtung des Radtrainings im Vergleich zum Lauftraining beruhen. Hier besteht also weiterer Untersuchungsbedarf.

4.3.5 Fragestellung 5: Prüfung der prognostischen Validität

In dem vorhergehenden Abschnitt zu Fragestellung 4 (4.3.4) ist bereits ein Aspekt im Hinblick auf die Validität des SimBEA-Modells untersucht worden: Im Zuge der simulationsbasierten Kalibrierung des Modells wurden die Modellparameter so bestimmt, dass die simulierten Leistungswerte mit den gegebenen realen Leistungswerten möglichst gut übereinstimmen. Die realen Leistungswerte waren hier also bekannt und geprüft wurde lediglich, ob und inwieweit es möglich ist, das Modell an eben diese Leistungsdaten anzupassen. Der Grad der Übereinstimmung wurde als Mass der Validität betrachtet und dem Modell insgesamt eine gute Validität bescheinigt.

Für praktische Zwecke, z.B. in der Trainingsplanung, ist es darüber außerdem erforderlich, die prognostische Validität zu prüfen. Es ist also nachzuweisen, dass das SimBEA-Modell auch zutreffende Prognosen ermöglicht. Dazu ist das Modell zunächst an vorliegenden Belastungs- und Leistungsdaten zu kalibrieren und anschließend zu prüfen, ob dieses Modell für eine zweite Belastungsphase den realen Verlauf der Leistungsfähigkeit richtig prognostizieren kann. Der Grad der Übereinstimmung der simulierten Leistungswerte mit den realen Leistungswerten kennzeichnet dann die prognostische Validität des Modells. Im Unterschied zum Vorgehen bei der Untersuchung von Fragestellung 4 wird hier die Übereinstimmung realer und simulierter Leistungswerte geprüft, ohne dass bereits durch die Kalibrierung eine optimale Anpassung der simulierten Werte an eben diese realen Leistungswerte angestrebt wurde.

Geprüft wird die prognostische Validität des SimBEA-Modells in drei Teiluntersuchungen, wobei unterschiedlich lange Kalibrierungs- und Prognosezeiträume betrachtet werden.

4.3.5.1 Kurzfristige Prognose

Methode und Hypothese

Im Trainingsalltag ist es erforderlich, Trainingsbelastungen kurzfristig auf den aktuellen Trainingszustand des Athleten abzustimmen, um so Über- oder Unterforderung zu vermeiden. Wird das SimBEA-Modell im Training fortlaufend an Belastungs- und Leistungsdaten eines Sportlers kalibriert, dann ließe es sich

eventuell für kurzfristige Simulationen von Trainingswirkungen und für Leistungsprognosen einsetzen. Z.B. könnte man dann aufgrund der vorliegenden Trainingsdaten die Wirkung des geplanten Trainings für den nächsten Mikrozyklus simulieren, um ggf. korrigierend in den Trainingsprozess einzugreifen. Für einen solchen Einsatzzweck ist jedoch die prognostische Validität über den entsprechenden Zeitraum von einer Woche nachzuweisen.

Hypothese 5.1:

Das an den Trainings- und Leistungsdaten weniger Mikrozyklen kalibrierte SimBEA-Modell kann die Leistungsentwicklung über einen Zeitraum von einer Woche zutreffend simulieren.

Die Hypothesenprüfung erfolgt anhand der Einzelfalluntersuchung 1. Das SimBEA-Modell soll dabei die Leistungswerte einzelner Untersuchungswochen vorhersagen. Kalibriert wird das Modell dafür auf unterschiedliche Weise über das Verfahren der simulationsbasierten Kalibrierung. Berücksichtigt werden dabei **erstens** Belastungs- und Leistungsdaten unterschiedlich langer Kalibrierungsabschnitte. **Zweitens** wird auch der Effekt unterschiedlicher Frequenzen der Leistungsmessung auf die Prognosegüte geprüft.

Erstens. Die Kalibrierung des Modells erfolgt über zwei, drei, vier und fünf Wochen. Dabei werden jeweils alle möglichen Abschnitte der sechswöchigen Untersuchung genutzt, um dann die Prognosegüte für die folgende Woche zu prüfen. So wird das SimBEA-Modell beispielsweise an der ersten und zweiten Woche kalibriert, um die Leistungswerte für die dritte Woche zu prognostizieren. Außerdem folgen eine Kalibrierung an der zweiten und dritten Woche, an der dritten und vierten Woche und an der vierten und fünften Woche, um die Entwicklung in der jeweils folgenden Woche zu simulieren. Entsprechend ist das Vorgehen bei den längeren Kalibrierungsabschnitten. Bei der Kalibrierung über fünf Wochen erfolgt schließlich nur eine Modellanpassung an den Daten der Wochen eins bis fünf und die Prognose für die sechste Untersuchungswoche.

Zweitens. Bei der Kalibrierung über zwei Wochen werden tägliche Leistungswerte herangezogen. Bei längeren Kalibrierungsphasen lassen sich auch geringere Messwertfrequenzen anwenden, so dass bei der Kalibrierung über drei bis fünf Wochen nicht nur tägliche Leistungsmessungen genutzt werden, sondern auch

Leistungswerte im Abstand von zwei und drei Tagen. Bei einer Messwertfrequenz von zwei Tagen kann die Kalibrierung einmal anhand des ersten, dritten, fünften usw. Wertes und einmal anhand des zweiten, vierten, sechsten usw. Wertes erfolgen. Entsprechend ist die Kalibrierung bei einer Messwertfrequenz von drei Tagen in drei Varianten möglich.

Das SimBEA-Modell wird jeweils an den entsprechenden Trainings- und Leistungswerten kalibriert (Kalibrierungsphase). Alle Möglichkeiten der Kalibrierung werden zur Modellprüfung herangezogen, so dass sich eine Vielzahl von an unterschiedlichen Daten kalibrierten Modellen ergibt. Anschließend simulieren alle diese Modelle die weitere Leistungsentwicklung für die real absolvierte Trainingsbelastung in der jeweils folgenden Untersuchungswoche.

Statistische Verfahren und Hypothesen

Die Beurteilung der Prognosegüte erfolgt hier über die Pearson-Korrelation und nicht über die Intraclass-Korrelation wie in den vorhergehenden Modellprüfungen. Dieses abweichende Vorgehen hat folgenden Grund: Bei der Simulation der Leistungsentwicklung werden die Modellzustände aus dem jeweils vorherigen Zustand berechnet. So ist der letzte berechnete Leistungswert in der Kalibrierungsphase der Ausgangswert für die weiteren Simulationsrechnungen. Weicht gerade dieser Wert aufgrund einer ungenauen Simulation vom realen Wert stark ab, so setzt sich dieser Simulationsfehler über die weiteren Berechnungen fort. So kann es dann sein, dass die belastungsbedingten Schwankungen der Leistungsfähigkeit zwar vom Modell gut erfasst werden, die Intraclass-Korrelation aber trotzdem einen niedrigen Zusammenhang aufweist, da sich die (zufällige) anfängliche Abweichung über die weiteren Datenpunkte fortsetzt und damit der Grad der mittleren Übereinstimmung der Daten niedriger ausfällt.

Für alle genannten Varianten der Kalibrierung werden global folgende statistische Hypothesen auf dem α -Niveau von $\alpha = .05$ im Rahmen von einseitigen Tests geprüft:

H₀5.1: Es besteht kein positiver Zusammenhang zwischen den prognostizierten Leistungswerten und den realen Leistungswerten in der Prognosephase von einer Woche ($r = 0$).

H_{15.1}: Zwischen den prognostizierten Leistungswerten und den realen Leistungswerten in der Prognosephase besteht ein positiver Zusammenhang ($r > 0$).

Die Hypothesenentscheidungen fallen im vorliegenden Fall aufgrund des Vergleichs der empirischen Prüfstatistik mit einem sogenannten kritischen Wert (vgl. Bortz, 1993): Dazu werden die Korrelationskoeffizienten t -transformiert und mit dem kritischen t -Wert $t_{\alpha} = 2.015$ verglichen ($\alpha = .05$, einseitiger Test, $n = 7$, $df = 5$). Korrelationen mit t -Werten oberhalb dieses kritischen t -wertes sind als signifikant anzusehen, so dass die Nullhypothese zu verwerfen und die Alternativhypothese anzunehmen ist. Für $r = .669$ und $r = .670$ ergeben sich t -Werte von 2.013 bzw. 2.018. Korrelationen mit $r = .67$ führen demnach zur Annahme der Alternativhypothese; Korrelationen mit $r < .67$ werden als nicht signifikant betrachtet.

Zum Veranschaulichen der großen Zahl an Korrelationen werden die einzelnen Korrelations-Koeffizienten in Abhängigkeit von der Kalibrierungsdauer (zwei, drei, vier oder fünf Wochen) und der Messwertdichte bei der Leistungserfassung (täglich, alle zwei Tage oder alle drei Tage) zusammengefasst. Die einzelnen Korrelationskoeffizienten werden dazu in Fishers Z -Werte transformiert, um dann die arithmetischen Mittelwerte zu bilden. Diese Mittelwerte lassen sich anschließend wieder zurücktransformieren (vgl. Bortz, 1993).

Ergebnisse

Im Durchschnitt ergeben sich für alle Kalibrierungsabschnitte und für alle Messwertdichten positive mittlere Korrelationen. Die Einzelwerte fallen allerdings teilweise sehr unterschiedlich aus; z.T. treten auch negative Korrelationen auf, insbesondere bei kurzer Kalibrierungsdauer und bei geringer Messwertdichte. Auf eine ausführliche Darstellung der Einzelergebnisse wird an dieser Stelle der Übersicht halber verzichtet, die einzelnen Korrelationskoeffizienten sind aber im Anhang zu finden (s. Tab. 20 bis Tab. 22). Zusammenfassend ist folgendes festzustellen:

- Bei täglicher Leistungsmessung und zweiwöchiger Kalibrierung liegt nur eine Korrelation über dem kritischen Wert von $r = .67$.
- Bei täglicher Leistungserfassung und Kalibrierungszeitabschnitten zwischen drei und fünf Wochen liegen alle Korrelationen über dem kritischen Wert von $r = .67$.

Abb. 16 zeigt die mittleren Validitätskoeffizienten für die verschiedenen Kalibrierungsabschnitte bei täglich vorliegenden Leistungswerten.

- Bei Leistungsmessungen im Abstand von zwei Tagen sind bei fünfwöchiger Kalibrierung alle Korrelationen größer als der kritische Wert. Bei kürzeren Kalibrierungsphasen von drei oder vier Wochen liegen zwei von sechs bzw. einer von vier Korrelationskoeffizienten unterhalb des kritischen Wertes.
- Bei Leistungsmessungen im Abstand von drei Tagen sind bei fünfwöchiger Kalibrierung alle Korrelationen größer als der kritische Wert. Bei kürzeren Kalibrierungsphasen von drei oder vier Wochen liegen vier von neun bzw. zwei von sechs Werten unterhalb des kritischen Wertes.

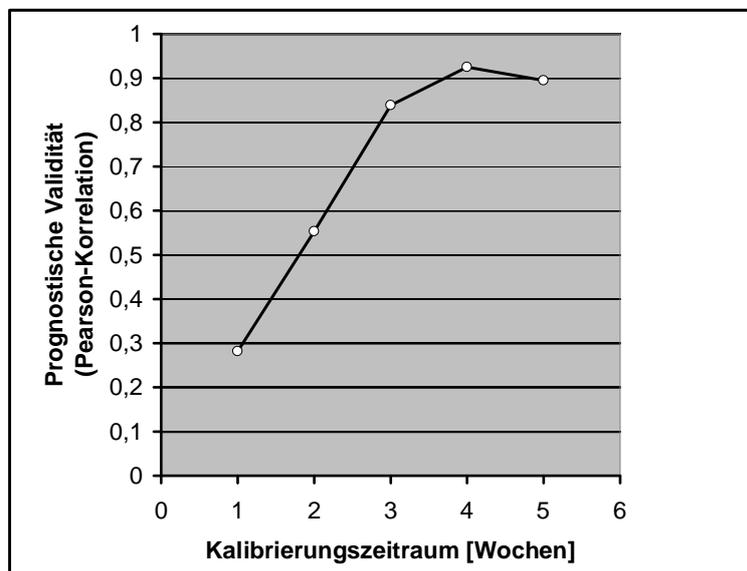


Abb. 16: Darstellung der Prognosegüte des SimBEA-Modells (mittlere Pearson-Korrelationen) für einwöchige Leistungsprognosen in Abhängigkeit von der Länge der Kalibrierungsdauer

Damit können in den Fällen von täglicher Leistungserfassung bei Kalibrierungsphasen von mehr als drei Wochen und in den Fällen einer fünfwöchigen Kalibrierung bei Messwertdichten von zwei und drei Tagen die Nullhypothesen verworfen und die Alternativhypothesen angenommen werden. Es bestehen demnach positive Zusammenhänge zwischen der realen Leistungsfähigkeit und der über eine Woche prognostizierten Leistungsfähigkeit.

Bei drei und vierwöchiger Kalibrierung mit Leistungswerten im Abstand von zwei bis drei Tagen fallen die Hypothesenentscheidungen teilweise zugunsten der Nullhypothese und teilweise zugunsten der Alternativhypothese aus; also nur in einigen

Fällen zeigen sich unter diesen Bedingungen signifikante Zusammenhänge zwischen der prognostizierten Leistung und der realen Leistungsfähigkeit. Bezüglich der zweiwöchigen Kalibrierung müssen fast alle Nullhypothesen beibehalten werden; es besteht hier nur in einem Fall ein signifikanter Zusammenhang zwischen prognostizierter und realer Leistungsfähigkeit.

Insgesamt ist festzustellen, dass das über wenige Wochen kalibrierte SimBEA-Modell die Leistungsentwicklung über einen Zeitraum von einer Woche zutreffend simulieren kann. Damit wird Hypothese 5.1 bestätigt.

Diskussion

Untersucht wurde die Übereinstimmung der simulierten und realen Leistungswerte bei einwöchiger Leistungsprognose mittels SimBEA-Modell. Die ermittelten statistischen Zusammenhänge lassen folgenden Schluss hinsichtlich der prognostischen Validität des Modells zu:

Nach einer mindestens drei Wochen umfassenden Kalibrierungsphase mit täglicher Leistungserfassung besteht bei einer anschließenden Leistungsprognose über eine Woche eine signifikante Übereinstimmung zwischen Modellverhalten und Realität. Werden wiederum die Bewertungskriterien von sportmotorischen Tests nach Weineck (1997) zur Beurteilung herangezogen, dann zeigt sich für die dreiwöchige Kalibrierung im Mittel eine *sehr gute* Prognosegüte ($M = .84$). Bei vier- und fünfwöchiger Kalibrierung sind die mittleren Korrelationskoeffizienten sogar *ausgezeichnet* ($M = .93$ bzw. $M = .90$) zu bewerten.

Bei fünfwöchiger Kalibrierung des SimBEA-Modells ergeben sich auch bei geringeren Messfrequenzen der Leistungsfähigkeit signifikante Zusammenhänge zwischen den simulierten und den realen Leistungswerten in der einwöchigen Prognosephase. Die mittleren Korrelationen von $M = .92$ (Leistungsmessung bei der Kalibrierung alle zwei Tage) und $M = .86$ (Leistungsmessung alle drei Tage) sprechen für eine *ausgezeichnete* Prognosegüte (Weineck, 1997).

Zusammenfassend sollte also das SimBEA-Modell für einwöchige Leistungsprognosen über drei oder vier Wochen kalibriert werden, wenn die Leistungswerte täglich vorliegen. Bei geringeren Messwertdichten (alle zwei oder drei Tage) ist eine fünfwöchige Kalibrierung anzustreben. Zwar ergeben sich hier auch bei kürzeren

Kalibrierungsphasen hohe mittlere Korrelationen, allerdings sind die zugrundeliegenden einzelnen Korrelationen nicht in allen Fällen signifikant, so dass mit einer höheren Unsicherheit der Prognose zu rechnen ist.

Unter den genannten Bedingungen bei der Modellkalibrierung ist dem SimBEA-Modell eine sehr gute bis ausgezeichnete Validität bezüglich der Leistungsprognose über den Zeitraum von einer Woche zu bescheinigen.

4.3.5.2 *Mittelfristige Prognose*

Methode und Hypothese

Die Simulation von Trainingswirkungen über mehrere Wochen oder Monate ließe sich in der mittelfristigen Trainingsplanung von Mesozyklen einsetzen. Die Validität bezüglich solcher mittelfristigen Prognosen wird anhand der beiden Einzelfalluntersuchungen (Untersuchung 1 und 2) geprüft und dazu das Modell jeweils an die erste Hälfte der vorliegenden Leistungswerte über das Verfahren der simulationsbasierten Kalibrierung angepasst (Kalibrierungsphase). Anschließend simuliert das Modell die weitere Leistungsentwicklung für die real absolvierte Trainingsbelastung. In der Prognosephase lässt sich dann für die zweite Hälfte der vorliegenden realen Leistungsdaten die Übereinstimmung mit den simulierten Leistungswerten bestimmen. Bezüglich beider Einzelfälle wird folgendes erwartet:

Hypothese 5.2:

Das an der ersten Hälfte der vorliegenden Leistungsdaten kalibrierte SimBEA-Modell kann den weiteren Verlauf der realen Leistungsfähigkeit zutreffend simulieren.

Statistische Verfahren und Hypothesen

Die Beurteilung der Prognosegüte erfolgt wiederum über die Pearson-Korrelation. Ergänzend werden der absolute und relative Simulationsfehler berechnet.

Für die Einzelfälle 1 und 2 sind folgende statistische Hypothesen auf dem α -Niveau von $\alpha = .05$ im Rahmen von einseitigen Tests zu prüfen:

H₀5.2.1 bzw. **H₀5.2.2:**

Es besteht kein positiver Zusammenhang zwischen den prognostizierten Leistungswerten und den realen Leistungswerten in der Prognosephase ($r = 0$).

H₁5.2.1 bzw. **H₁5.2.2:**

Zwischen den prognostizierten Leistungswerten und den realen Leistungswerten in der Prognosephase besteht ein positiver Zusammenhang ($r > 0$).

Ergebnisse

Abb. 17 und Abb. 18 zeigen den Verlauf der simulierten HF_{AST}-Werte in der Kalibrierungs- und Prognosephase im Vergleich zu den gemessenen Werten. Für Einzel fall 1 ergibt sich ein Zusammenhang der realen und simulierten Leistungswerte von $r = .541$ ($p < .01$). Der absolute Fehler beträgt 5.27 Schläge/min entsprechend einem relativen Fehler von 3.50 %. Im Einzelfall 2 zeigt sich ein Zusammenhang von $r = .56$ ($p < .05$). Absoluter und relativer Fehler betragen 15.1 Schläge/min bzw. 9.50 %.

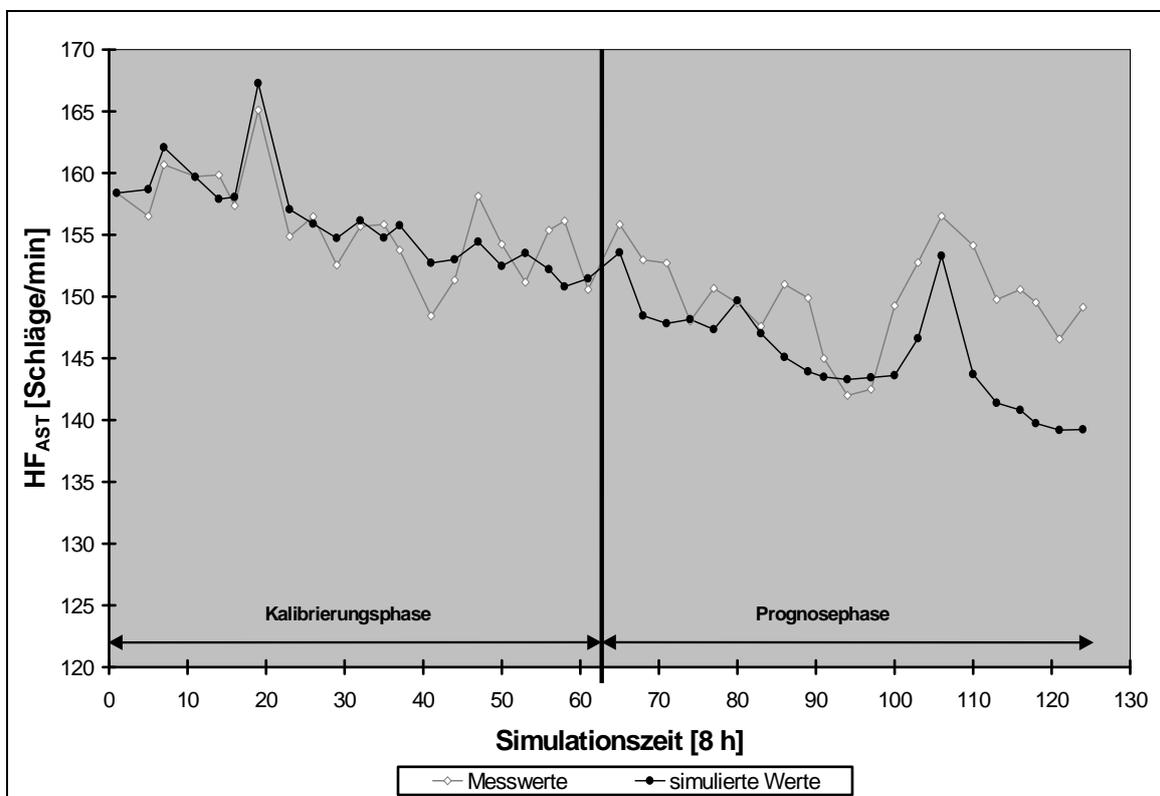


Abb. 17: Verlauf der gemessenen und simulierten Herzfrequenz-Werte in der Kalibrierungs- und Prognosephase für Untersuchung 1

Demnach kann in beiden Einzelfällen die Nullhypothese verworfen werden. Die Hypothesenentscheidungen fallen damit zugunsten der Alternativhypothesen aus. In beiden Fällen bestehen positive Zusammenhänge zwischen den prognostizierten und den realen Leistungsdaten.

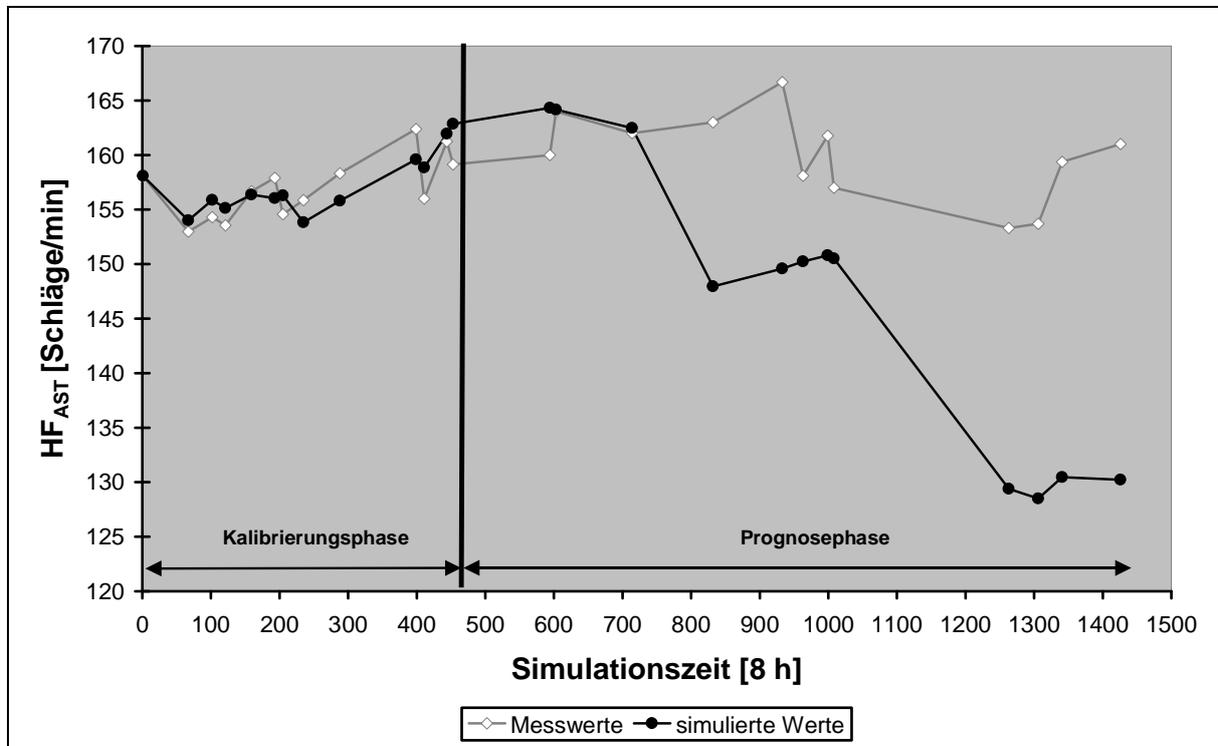


Abb. 18: Verlauf der gemessenen und simulierten Herzfrequenz-Werte in der Kalibrierungs- und Prognosephase für Untersuchung 2

Diese ermittelten Zusammenhänge zwischen den prognostizierten und den gemessenen Werten sind zwar ein Indiz für die Bestätigung von Hypothese 5.2, wonach das an der ersten Hälfte der vorliegenden Leistungsdaten kalibrierte SimBEA-Modell den weiteren Verlauf der realen Leistungsfähigkeit simulieren können soll. Insbesondere im Einzelfall 2 fallen im Verlauf der prognostizierten Leistungswerte jedoch deutliche Abweichungen von den realen Daten auf (vgl. Abb. 18), die sich auch im Simulationsfehler mit 15.1 Schlägen/min bzw. 9.50 % ausdrücken. Hypothese 5.2 wird damit nur eingeschränkt bestätigt. Im Folgenden wird näher auf mögliche Ursachen für diese eingeschränkte Bestätigung eingegangen.

Diskussion

Untersucht wurde die Prognosegüte des SimBEA-Modells über einen Zeitraum von drei Wochen bei dreiwöchiger Kalibrierung und über 46 Wochen bei einer Kalibrie-

rung über 22 Wochen. Zwischen den gemessenen und den simulierten Leistungsdaten bestehen in beiden Fällen signifikante Zusammenhänge. Nach den Kriterien von Bortz und Döring (1995) sprechen die Korrelationen von $r = .54$ bzw. $r = .56$ für eine mittelmäßige prognostische Validität des Modells unter den vorliegenden Bedingungen. Wird zusätzlich der absolute und relative Fehler der Leistungsprognose berücksichtigt, dann ist diese Bewertung im Einzelfall zu hinterfragen (Fehler: 15.1 Schläge/min bzw. 9.50 %). Insbesondere zwischen dem 16. und 17. sowie dem 21. und 22. HF_{AST} -Messwert für die Leistungsfähigkeit treten in der Simulation deutlich größere positive Anpassungen, d.h. Abnahmen der Herzfrequenz, auf als bei den gemessenen Werten. Wodurch sind diese extremen Abweichungen von Modell- und Realverhalten zu erklären?

Offenbar führen die Trainingsbelastungen im Modell zu größeren Leistungsentwicklungen als in der Realität. Ein Blick auf den Verlauf der mittleren wöchentlichen Belastungen im Untersuchungszeitraum zeigt, dass die weitaus größte Trainingsbelastung in der 44. Untersuchungswoche auftritt, die zwischen dem 16. und 17. HF_{AST} -Messwert für die Leistungsfähigkeit liegt (vgl. Abb. 9). In dieser Zeit wurde ein Trainingslager mit besonders hohen Trainingsumfängen durchgeführt. Das SimBEA-Modell wurde über die ersten 13 Messwerte kalibriert. Die Trainingsbelastungen lagen in dieser Zeit deutlich unter der Belastung des Trainingslagers, so dass das Modell für derartige Spitzenbelastungen nicht kalibriert ist. Entsprechend zeigt es dann in der Prognosephase ein nicht-adäquates Anpassungsverhalten, das die realen Anpassungen bei weitem übertrifft.

Um diese hypothetische Erklärung zu prüfen, wird das SimBEA-Modell erneut kalibriert. Dabei wird der ursprüngliche Kalibrierungszeitraum (erster bis 13. HF_{AST} -Messwert) bis zum 17. HF_{AST} -Wert ausgeweitet, so dass die Spitzenbelastung des Trainingslagers (zwischen 16. und 17. Messwert) gerade noch in die Kalibrierungsphase fällt (vgl. Abb. 19). Wie gehabt prognostiziert das SimBEA-Modell dann die weitere Leistungsentwicklung für das anschließend absolvierte Training. Zwischen den prognostizierten und den realen Daten ergibt sich daraufhin zwar nur ein ähnlich hoher, mittlerer Zusammenhang von $r = .52$ ($p < .10$), der aufgrund der nunmehr kleinen Messwertzahl nur noch tendenziell signifikant ist. Jedoch ist jetzt der Simulationsfehler deutlich niedriger: Statt 15.1 Schlägen/min bzw. 9.50 % beträgt er nur noch 5.52 Schläge/min bzw. 3.47 %. Der Verlauf der Daten zeigt ebenfalls, dass

die prognostizierten und gemessenen HF_{AST} -Werte nun besser übereinstimmen (vgl. Abb. 20). Offenbar kann das Modell Anpassungsprozesse für einen Belastungsbereich nur dann zutreffend simulieren, wenn es auch in einem vergleichbaren Belastungsbereich kalibriert wurde. Unter diesen Bedingungen erscheint nun im Einzelfall 2 die Bewertung der gefundenen Korrelation von $r = .52$ als mittlere prognostische Validität gerechtfertigt.

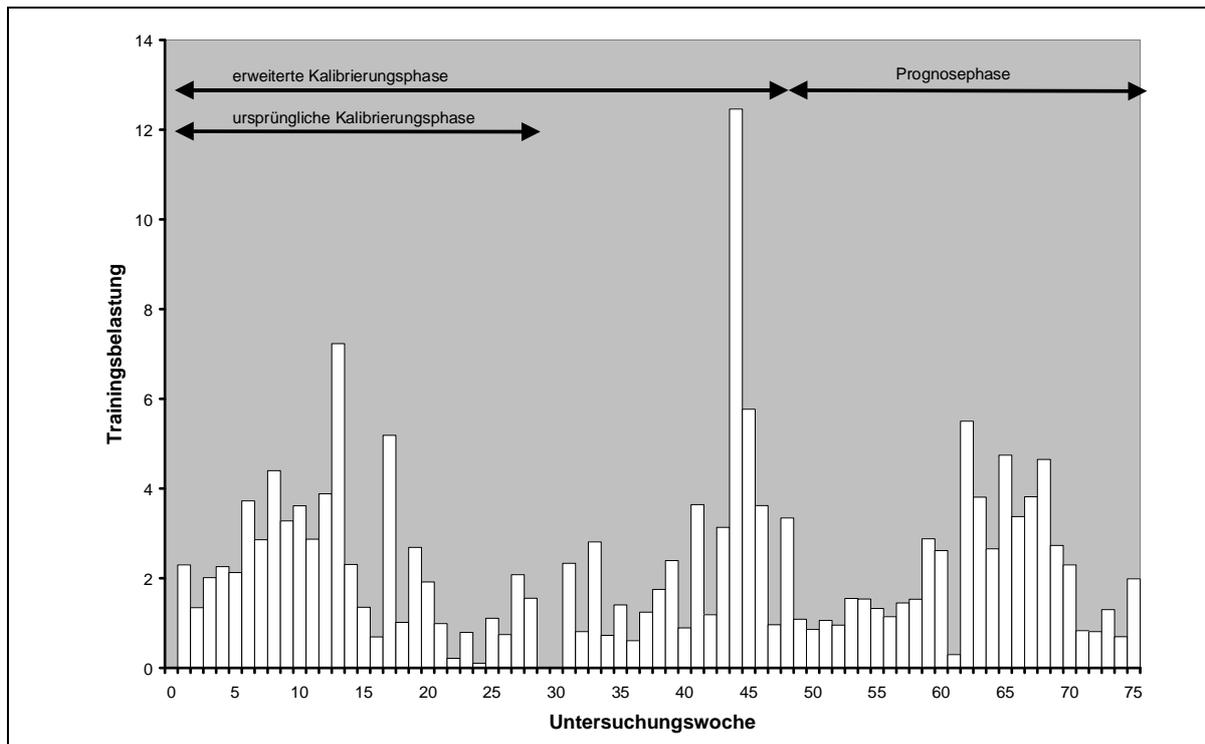


Abb. 19: Dynamik der wöchentlichen Belastung für Untersuchung 2 mit Markierung der ursprünglichen und erweiterten Kalibrierungs- und Prognosephase

Eine hohe prognostische Validität wird dennoch in beiden Einzelfällen nicht erreicht. Hypothese 5.2 ist demnach nur teilweise als bestätigt anzusehen. Mittelfristige Leistungsprognosen sind also nur mit mittlerer Genauigkeit möglich. Im Vergleich zur kurzfristigen Prognose über eine Woche ist die Vorhersagequalität bei längeren Prognosephasen deutlich geringer. Bei der Ausweitung der Prognosephase von drei auf 28 Wochen (und entsprechend langer Kalibrierungsphase über 40 Wochen) nimmt die Prognosegüte dagegen nicht weiter ab. Sowohl im Einzelfall 1 als auch im Einzelfall 2 sind die Validitätskoeffizienten mit $r = .54$ und $r = .52$ und die Simulationsfehler mit 3.50 % und 3.47 % ähnlich hoch. Dass die Vorhersagegenauigkeit gegenüber der einwöchigen Prognose abfällt, hat möglicherweise folgende Gründe:

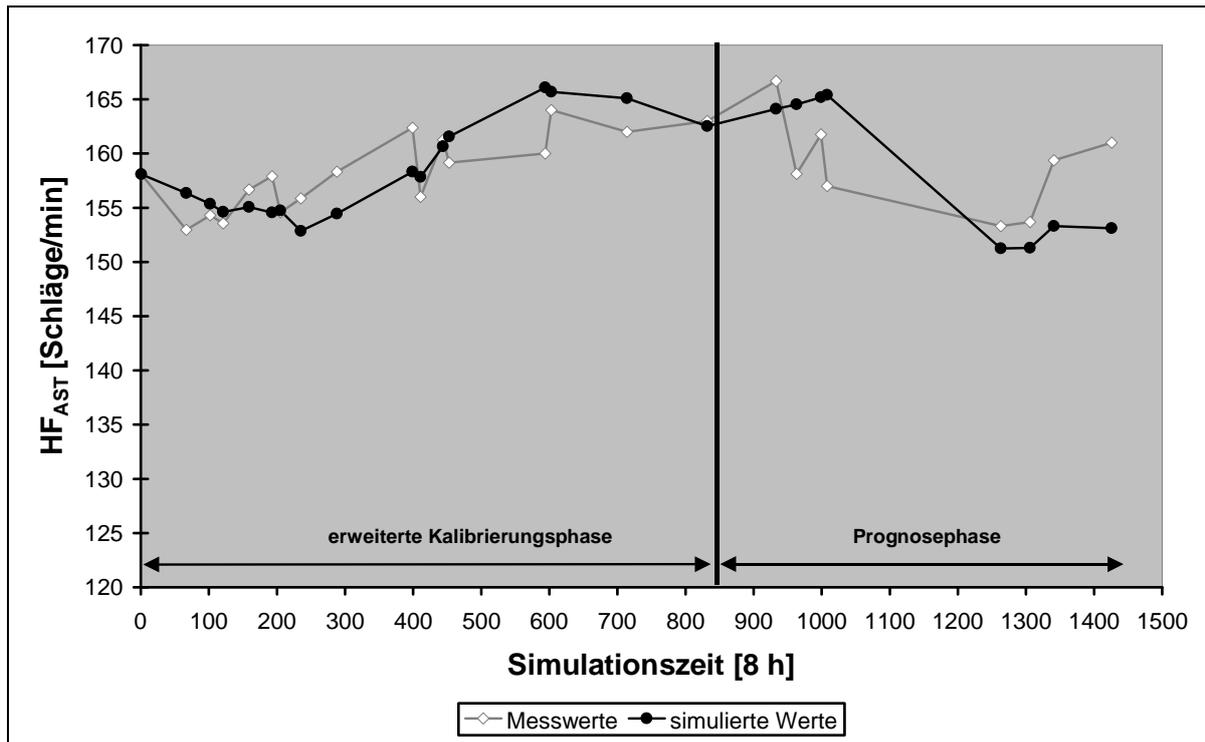


Abb. 20: Verlauf der gemessenen und simulierten Herzfrequenz-Werte in der Kalibrierungs- und Prognosephase für Untersuchung 2 bei modifizierter Kalibrierungsphase

Wie schon im Zusammenhang mit Fragestellung 4 zur Validität diskutiert wurde, ist das SimBEA-Modell eine erhebliche Vereinfachung der Realität. So ist zu erwarten, dass neben den im Modell berücksichtigten Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit, die hier über den Ausdauer-Standard-Test operationalisiert wurde, noch weitere Faktoren auf die Leistungsfähigkeit einwirken. Dies können sowohl weitere unberücksichtigte Prozesse innerhalb der Adaptation an die Trainingsbelastung sein, als auch außerhalb des Trainings anzusiedelnde Störfaktoren. Als ein Beispiel seien psychische Belastungsfaktoren erwähnt, die über das vegetative Nervensystem auch auf die Herzfrequenz Einfluss haben. Solche Störeffekte können die Prognosegüte beeinträchtigen. Sie wären allerdings dann zu vernachlässigen, wenn ihre Einwirkung nur kurzzeitig auftritt; wenn psychischer Stress beispielsweise einige Herzfrequenzwerte beeinflusst und damit kurzzeitig die Simulationsgenauigkeit reduziert, anschließend aber die simulierte und die berechnete Herzfrequenz wieder besser übereinstimmen. Da viele Störfaktoren denkbar sind, können ihre Effekte auf die Simulationsgenauigkeit im Einzelnen kaum abgeschätzt oder gar kontrolliert werden. Deshalb sollte bei praktischen Einsätzen des Modells Wert auf eine

möglichst breite Datenbasis bei der Kalibrierung gelegt werden, um den Einfluss einzelner Störeffekte auf die Kalibrierung möglichst zu reduzieren.

Die Ergebnisse legen außerdem die Vermutung nahe, dass die Modellparameter sich im Laufe der Zeit verändern. Während über eine Woche noch sehr gute Prognosen möglich sind, in der ja genauso mit Störeffekten zu rechnen ist, nimmt diese Genauigkeit bereits bei dreiwöchiger Prognose ab. Da im Rahmen der Validierung des Modells über die Untersuchung 2 bei einer Untersuchungsdauer von 68 Wochen zumindest eine Validität von $r_{ICC} = .65$ erzielt wurde, ist immerhin von einer mittleren Stabilität der Parameter auszugehen. Trotzdem können die Parameter möglicherweise kurzfristigen Veränderungen unterliegen, die z.B. im Zusammenhang mit Veränderungen der Leistungsfähigkeit stehen könnten. So ist in der Trainingslehre bekannt, dass Erholungsfähigkeit und Anpassungsverhalten mit dem Trainingszustand bzw. der Leistungsfähigkeit zusammenhängen (s. auch 4.3.6.1). Als praktische Konsequenz lässt sich daraus ableiten, dass nach Möglichkeit eine laufende trainingsbegleitende Überprüfung der Modellkalibrierung und ggf. eine Neukalibrierung vorzunehmen ist.

4.3.5.3 Langfristige Prognose

Methode und Hypothese

In einer abschließenden Analyse zur prognostischen Validität stellt sich nun die Frage, inwiefern ein einmal kalibriertes Modell auch nach längerer Zeit noch für Leistungsprognosen einsetzbar ist. Einerseits ist davon auszugehen, dass sich im Laufe der Zeit die Anpassungsreaktionen an Trainingsbelastungen verändern. Andererseits ist dagegen zu vermuten, dass charakteristische Reaktionsweisen eines Athleten auch über längere Zeit stabil sind, so dass entsprechende Belastungs- und Anpassungsprozesse zumindest tendenziell simulierbar sind. Folgende Hypothese ist zu prüfen:

Hypothese 5.3:

Das am Einzelfall kalibrierte SimBEA-Modell charakterisiert das langfristige athletenspezifische Anpassungsverhalten an Trainingsbelastungen.

Geprüft wird diese Vermutung über die Daten der Einzelfalluntersuchungen 1 und 2. Die Daten wurden an einem Ausdauersportler im zeitlichen Abstand von ca. zwei

Jahren erhoben. Untersuchung 1 umfasste fast ausschließlich Laufbelastungen über einen Zeitraum von sechs Wochen. Untersuchung 2 erstreckte sich dagegen über 68 Wochen und schloss auch Abschnitte mit umfangreichen Radbelastungen ein. Die Belastungen und Trainingsmittel in der zweiten Untersuchung differierten also stärker, beinhalteten aber auch Laufbelastungen, wie sie in der ersten Untersuchung aufgetreten sind. Deshalb wird das an den Trainings- und Leistungsdaten der Einzelfalluntersuchung 2 kalibrierte SimBEA-Modell zur Simulation der Leistungswerte für die erste Untersuchungsphase genutzt (Einzelfalluntersuchung 1). Wenn das Modellverhalten über längere Zeit stabil bleibt, müsste das so kalibrierte Modell die Leistungsdaten für die erste Einzelfalluntersuchung aus den Trainingsdaten zutreffend berechnen können, so dass die simulierten und die realen Leistungswerte übereinstimmen.

Statistische Verfahren und Hypothesen

Geprüft wird die Übereinstimmung der Leistungswerte über die Intraclass-Korrelation. Dazu werden folgende Hypothesen auf dem α -Niveau von $\alpha = .05$ getestet:

- H₀5.3:** Es besteht kein positiver Zusammenhang zwischen den berechneten Leistungswerten und den realen Leistungswerten ($r_{ICC} = 0$).
- H₁5.3:** Zwischen den berechneten Leistungswerten und den realen Leistungswerten besteht ein positiver Zusammenhang ($r_{ICC} > 0$).

Ergebnis

Der Verlauf der prognostizierten HF_{AST}-Werte im Vergleich zu den gemessenen Werten ist in Abb. 21 dargestellt. Beide Datenreihen zeigen einen ähnlichen Entwicklungstrend. Die Intraclass-Korrelation für den Zusammenhang zwischen den realen und den simulierten Leistungswerten beträgt $r_{ICC} = .55$ ($df = (40, 41, 0)$, $p < .001$) bzw. $r = .73$ ($p < .001$). Gemäß der üblichen Vorgehensweise beim Testen von Hypothesen kann die Nullhypothese verworfen und die Alternativhypothese angenommen werden. Es besteht demnach ein Zusammenhang zwischen den berechneten und den simulierten Leistungswerten.

Das Ergebnis bestätigt die Überlegungen zur zeitlichen Stabilität des Modellverhaltens. Entsprechend Hypothese 5.3 charakterisiert das am Einzelfall

kalibrierte SimBEA-Modell offenbar das langfristige athletenspezifische Anpassungsverhalten an Trainingsbelastungen.

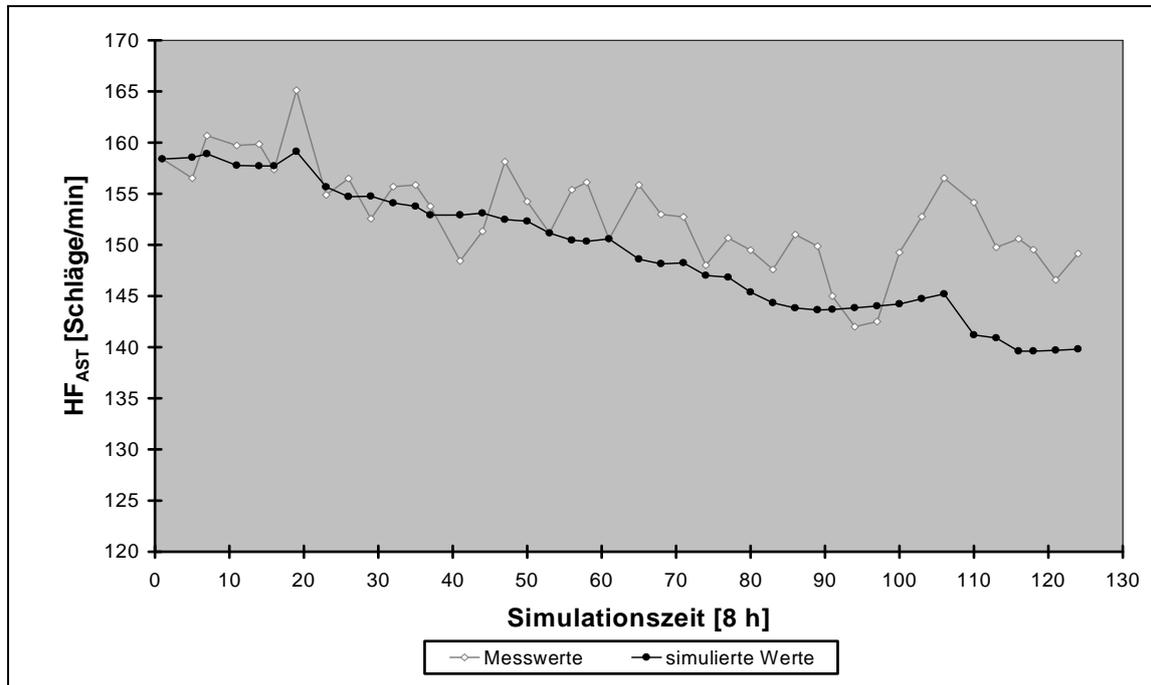


Abb. 21: Verlauf der in Untersuchung 1 gemessenen Herzfrequenz-Werte und der prognostizierten Werte, die mit dem an Untersuchung 2 kalibrierten SimBEA-Modell berechnet wurden

Diskussion

Die signifikante Intraclass-Korrelation von $r_{ICC} = .55$ entspricht einem mittleren Zusammenhang der berechneten und realen Leistungswerte. Gemäß dem Bewertungsmaßstab von Bortz und Döring (1995) ist dieser Wert als mittlere Validität des Modells zu interpretieren. D.h. auch in einem zeitlichen Abstand von zwei Jahren zwischen Kalibrierungs- und Prognosephase kann die Belastungs- und Anpassungswechselwirkung mit einer mittleren Prognosegüte simuliert werden. Diese mittlere Validität ist zwar für genaue Prognosezwecke sicher nicht ausreichend. Im Vergleich zur prognostischen Validität bei mittelfristigen Prognosen fällt der Korrelationskoeffizient dennoch bemerkenswert hoch aus, liegt er doch mit $r_{ICC} = .55$ und $r = .73$ im bzw. sogar über dem Bereich der dort ermittelten Werte von $r = .54$ und $r = .56$. (bzw. $r = .52$ bei der erweiterten Kalibrierung). Höhere Werte sind bei dem großen zeitlichen Abstand zwischen Kalibrations- und Prognosephase sicher nicht zu erwarten gewesen. Der Verlauf der gemessenen und prognostizierten Werte zeigt, dass die langfristige Leistungsveränderung offenbar relativ gut simuliert

wird, während die kurzfristigen Schwankungen der Leistungsfähigkeit vom Modell dagegen kaum vorhergesagt werden. Hierdurch erklärt sich auch die nur mittelmäßige prognostische Validität. Doch warum werden die kurzfristigen Schwankungen vom Modell nicht entsprechend gut vorhergesagt?

Hierfür ist vermutlich nicht der große zeitliche Abstand zwischen der Kalibrierungsphase und der Prognosephase und damit eine geringe zeitliche Stabilität der Modellparameter und des Modellverhaltens verantwortlich zu machen. Vielmehr dürfte das SimBEA-Modell einfach aufgrund der geringen Messwertdichte bei der Kalibrierung (Untersuchung 2: 25 Werte in 68 Wochen) nicht für Simulationen von kurzfristigen Schwankungen eingestellt sein, wie sie in den täglich vorliegenden HF_{AST} -Werten zu finden sind. Gestützt wird diese Vermutung auch dadurch, dass ein großer Teil der Ausdauer-Standard-Tests in Untersuchung 2 jeweils nach einem Ruhetag durchgeführt wurde, also in relativ erholtem Zustand. Kurzfristige, ermüdungsbedingte Herzfrequenzanstiege dürften damit in den Messdaten in deutlich geringerer Masse als in Untersuchung 1 auftreten, so dass das an diesen Daten kalibrierte Modell diese Anstiege in geringerem Maße simuliert.

Da das langfristige Anpassungsverhalten in Untersuchung 1 relativ gut durch das an Untersuchung 2 kalibrierte SimBEA-Modell erfasst wird, kann dem SimBEA-Modell aufgrund des vorliegenden Ergebnisses durchaus eine mittlere zeitliche Stabilität des Modellverhaltens über die Zeitspanne von zwei Jahren bescheinigt werden.

Die Ergebnisse zeigen ferner (ähnlich wie im Zusammenhang mit Hypothese 5.2 diskutiert), dass das SimBEA-Modell nur diejenigen Aspekte eines Anpassungsprozesses simulieren kann, die durch die vorliegenden Daten bei der Kalibrierung auch erfasst werden. So sind nicht nur die Belastungen so zu wählen, dass der trainingsrelevante Bereich einschließlich möglicher Belastungsspitzen abgedeckt ist, sondern durch die Messwertdichte sind auch die ermüdungsabhängigen, kurzfristigen Leistungsschwankungen zu erfassen, wenn entsprechende Ermüdungseffekte später vom Modell simuliert werden sollen. Dazu wäre für die Kalibrierung dann zumindest gelegentlich die Leistungsfähigkeit in so dichter Folge zu erfassen, dass in kurzen Abständen ebenso Werte bei erholtem wie ermüdetem Zustand vorliegen.

4.3.6 Fragestellung 6: Validität der Modellparameter

Im Folgenden wird die Validität des SimBEA-Modells in Anlehnung an das Verfahren der Konstruktvalidität (vgl. 4.1.2.1; Bortz & Döring, 1995) untersucht. Dazu werden aus vorliegenden Erkenntnissen Hypothesen zum Zusammenhang zwischen der Ausdauerleistungsfähigkeit und der Ausprägung der Modellparameter abgeleitet und diese Hypothesen anschließend anhand der Untersuchung 3 geprüft.

4.3.6.1 Empirische Erkenntnisse zum Zusammenhang von Leistungsfähigkeit und Anpassungsdynamik

In der Trainingswissenschaft herrscht weitgehende Einigkeit darüber, dass sich leistungsstärkere Athleten hinsichtlich Belastbarkeit und Erholungsfähigkeit von leistungsschwächeren unterscheiden (Schnabel et al., 1994; Weineck, 1997; Martin et al., 1993; Platonov, 1999). Einen anschaulichen Überblick über die Dynamik von Belastungs-, Wiederherstellungs- und Anpassungsreaktionen bei Sportlern unterschiedlicher Qualifikation liefert Platonov (1999). Er kommt zusammenfassend zu dem Ergebnis:

„Je geringer die Qualifikation des Sportlers, desto ausgeprägter sind Ermüdung und Veränderungen in den aktiv beteiligten Systemen, umso länger dauert die Wiederherstellungsperiode“ (Platonov, 1999, S. 26).

Demnach führen gleiche Belastungen bei leistungsfähigeren Athleten zu geringeren Ermüdungen als bei Sportlern mit geringerer Leistungsfähigkeit. Dieses ist schon allein damit zu erklären, dass mit zunehmender Leistungsfähigkeit die verfügbaren Ressourcen des Sportlers bei gleicher Belastung weniger gefordert werden. So weisen viele physiologische Parameter bei hoher Leistungsfähigkeit im Regelfall auf eine geringere Beanspruchung durch die Belastung hin. Je höher die aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit ausgeprägt ist, umso niedriger sind beispielsweise Herzfrequenzen und Laktatkonzentrationen bei Standardbelastungen (z.B. Hollmann & Hettinger, 2000; Neumann et al., 2000). Außerdem kann der Sportler mit der besseren aeroben Ausdauer dieselbe Belastung zu einem größeren Teil über die Oxidation von Fettsäuren energetisch absichern. Bei geringerer aerober Ausdauer muss dagegen in erhöhtem Maße auf Glykogenreserven zurückgegriffen werden, so

dass es zur schnelleren Entleerung dieser Energiespeicher und damit zur stärkeren Ermüdung kommt (Hollmann & Hettinger, 2000).

Nach Platonov (1999) beeinflusst die Leistungsfähigkeit nicht nur die Höhe der Ermüdung nach einer Belastung. Leistungsstärkere Sportler erholen sich auch schneller von Trainingsbelastungen als leistungsschwächere Athleten. Dies gilt nach Platonov nicht nur dann, wenn Sportler unterschiedlicher Leistungsfähigkeit dieselben Trainingsbelastungen bewältigen, die einen Sportler mit geringerer Leistungsfähigkeit stärker beanspruchen und ermüden. Auch wenn sich Athleten unterschiedlicher Leistungsfähigkeit maximal belasten, erholen sich leistungsstärkere Athleten schneller von dieser Belastung. Eine bessere Erholungsfähigkeit steht im Zusammenhang mit dem Niveau der Ausdauer- und insbesondere der Grundlagenausdauerfähigkeit, also mit der Leistungsfähigkeit des aeroben Stoffwechsels. Denn eine hohe aerobe Leistungsfähigkeit fördert über eine bessere Energieversorgung die energieverbrauchenden Erholungs- und Anpassungsprozesse (Jakowlew, 1977). Bezüglich der Dauer von Erholungsprozessen konnte z.B. Platonov (1999, S. 27) feststellen, dass die Wiederherstellung nach Maximalbelastungen bei hochklassigen Schwimmern nur etwa halb so lange dauert wie bei gering qualifizierten Schwimmern.

Dass höher qualifizierte Sportler sich offenbar besser regenerieren, ist auf höhere maximale Syntheseraten zurückführbar, die den Wiederaufbau der jeweils abgebauten energiereichen Substrate bzw. der zerstörten funktionellen Strukturen betreffen. So stellt Jakowlew (1976, S. 66) fest, dass unter dem Einfluss von Training die Aktivität von Enzymsystemen zunimmt, die entgegengesetzt wirkende Stoffwechselreaktionen katalysieren. An verstärkte Muskelarbeit adaptierte Tiere zeigen z.B. gleichzeitig höhere Aktivitäten der Glykogenphosphorylase und Glykogensynthetase bzw. der Proteinase und Aminoacyl-RNA-Synthetasen. Die Trainingsadaptation erhöhen also „nicht nur die Arbeitsfähigkeit des Organismus, sondern auch seine Möglichkeiten zur weiteren Vertiefung der Adaptation“ (Jakowlew, 1976, S. 66). Die Regenerations- und Anpassungsprozesse des besser trainierten und damit leistungsfähigeren Athleten weisen demnach höhere Kapazitäten, also größere maximale Syntheseraten auf.

Entsprechend ist die größere Glykogen-Superkompensation der Leistungssportler dann auch mit höheren maximalen Syntheseraten durch eine gesteigerte Glykogen-

synthetaseaktivität bei eben diesen Sportlern zu erklären (Jakowlew, 1976; Neumann et al., 1998). Auch bei der Regeneration von funktionellen Eiweißstrukturen, wie kontraktile Filamenten, Enzymsystemen, Mitochondrien usw., wirken maximale Syntheseraten begrenzend. Nach Goldspink (1992) wirkt innerhalb der Proteinbiosynthese nicht die Aktivierung des genetischen Apparates der Zelle und die Bereitstellung von mRNA (die Transkription) begrenzend. Vielmehr ist vermutlich die eigentliche Synthese der Proteine an den Ribosomen (die Translation) der limitierende Faktor. Besser trainierte und damit leistungsfähigere Athleten weisen einen höheren Ribosomengehalt auf und verfügen damit über höhere Syntheseraten und eine bessere Regenerations- und Anpassungsfähigkeit (Jakowlew, 1976; Goldspink, 1992):

„The regulation of growth [...] is probably limited by the rate of translation of the message into protein. In this context it is interesting to note that the ribosomal density is increased very significantly during hypertrophy“ (Goldspink, 1992, S. 224).

Da viele biochemische Synthesen energieintensiv sind und damit auch vom aeroben Stoffwechsel abhängen, kann die aerobe Stoffwechselkapazität indirekt die maximalen Syntheseraten begrenzen. Dieses betrifft z.B. die Regeneration des Kreatinphosphats oder die Synthese von Proteinen. Bei ausdauertrainierten Sportlern laufen diese Prozesse möglicherweise wegen der höheren maximalen aeroben Energieflussrate schneller ab, so dass die aerobe Kapazität hier wie eine maximale Syntheserate wirkt. Dem aeroben Grundlagenausdauertraining wird deshalb auch die Funktion zugeschrieben, die Erholungsfähigkeit zu verbessern und damit eine höhere Belastbarkeit sicherzustellen (Schnabel et al., 1994; Neumann et al., 1998).

Obwohl die Erholungsfähigkeit mit der Leistungsfähigkeit und insbesondere mit der aeroben Ausdauer zunimmt, werden die durch Training erzielbaren Leistungsfortschritte mit zunehmender Leistungsfähigkeit immer geringer (Letzelter, 1978). Trotz zunehmender Trainingsbelastung wird der Gewinn an Leistungsfähigkeit kleiner. Dieses Phänomen spiegelt sich in den Trainingslehren im sog. Prinzip der progressiven Belastung wider (Martin et al., 1993; Schnabel et al., 1994; Letzelter, 1978; Zintl & Einsenhut, 2001). Optimale langfristige Leistungsfortschritte sind danach nur zu erzielen, wenn die Belastung mit steigender Leistungsfähigkeit

kontinuierlich erhöht wird. Denn bei höherer Leistungsfähigkeit verliert eine gleichbleibende äußere Belastung ihren Reiz für den Organismus, da die innere Belastung abnimmt. Die adaptiven Biosynthesen werden dann in geringerem Maße durch die Belastung aktiviert (Jakowlew, 1976), so dass die anschließende Superkompensation ebenfalls geringer ausfällt. Letzelter (1978) betont darüber hinaus, dass mit verbessertem Trainingszustand nicht nur die äußere, sondern auch die innere Belastung (die Beanspruchung) zu erhöhen ist, da der Sportler lernt, seine Energiereserven besser auszuschöpfen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Leistungsfähigkeit eines Sportlers sein Regenerations- und Anpassungsverhalten beeinflusst. Wird das SimBEA-Modell an verschiedene Sportler angepasst, dann ist aufgrund dieser Erkenntnisse zu erwarten, dass sich die Sportler in Abhängigkeit von ihrer Leistungsfähigkeit in der Ausprägung einzelner Parameter des SimBEA-Modells unterscheiden:

Hypothese 6:

Die individuelle Parameterausprägung hängt von der Leistungsfähigkeit des modellierten Athleten ab.

Im folgenden Abschnitt werden Hypothesen zum Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit und der Ausprägung einzelner Parameter aufgestellt, die sich aus den vorgestellten Erkenntnissen ableiten.

4.3.6.2 Hypothesen zum Zusammenhang von Leistungsfähigkeit und Parameterausprägung

Parameter BF

Parameter BF beschreibt im Modell den Ermüdungseffekt einer Belastung. Kleine, nahe an Null liegende Werte entsprechen einer geringen belastungsabhängigen Ermüdung. Große Werte bewirken eine hohe Ermüdung und entsprechende Leistungsabnahme. Zu erwarten ist, dass leistungsfähigere Sportler auf ein und dieselbe Belastung mit einer geringeren Abnahme der Leistungsfähigkeit reagieren (Letzelter, 1978; Platonov, 1999), also weniger stark ermüden, und BF dementsprechend kleiner ist. Damit ist ein negativer Zusammenhang zwischen Parameter BF und der Leistungsfähigkeit anzunehmen.

*Parameter $(AF - 1) * BF$*

Das Produkt $(AF - 1) * BF$ beschreibt die Höhe der eintretenden Superkompensation in Folge einer Trainingsbelastung, nachdem sich der Sportler im Anschluss an die Belastung erholt hat und die Anpassungsprozesse vollständig abgelaufen und beendet sind. Da ein und dieselbe Trainingsbelastung für leistungsfähigere Athleten einen geringeren Trainingsreiz darstellt als für leistungsschwächere Athleten (Letzelter, 1978), fällt die Trainingsanpassung an eine Belastung und damit die Superkompensation bei höherer Leistungsfähigkeit geringer aus. Zu erwarten ist also, dass ein negativer Zusammenhang zwischen dem Produkt $(AF - 1) * BF$ und der Leistungsfähigkeit besteht.

Parameter APR_{max}

Parameter APR_{max} beschreibt die maximale Erholungsrate im Modell. Sie charakterisiert damit die Belastbarkeit des Athleten: Je höher die maximale Erholungsrate ist, umso höhere Belastungen kann der Sportler verarbeiten und umso schneller kann er sich an diese Belastungen anpassen. Da leistungsfähigere Athleten im Regelfall auch höhere Trainingsbelastungen verkraften und damit belastbarer sind (Jakowlew, 1976), ist ein positiver Zusammenhang zwischen Parameter APR_{max} und der Leistungsfähigkeit zu erwarten.

Parameter VA

Parameter VA beschreibt, wie schnell sich ein Sportler von Trainingsbelastungen erholt: Je kleiner VA, desto schneller laufen die Erholungs- und Anpassungsprozesse ab. Leistungsfähigere Sportler erholen sich üblicherweise schneller von einer Trainingsbelastung (Platonov, 1999). Das gilt insbesondere bezüglich der Ausdauerleistungsfähigkeit. Damit ist zu erwarten, dass bei höherer Leistungsfähigkeit Parameter VA kleiner ausfällt, dementsprechend ein negativer Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit und Parameter VA besteht.

4.3.6.3 Statistische Verfahren und Hypothesen

Zur statistischen Hypothesenprüfung wird die Pearson-Korrelation zwischen der Durchschnittsgeschwindigkeit im Zeitfahren v_{ZF} bzw. der Laufgeschwindigkeit bei einem Laktatwert von 3 mmol/l im Stufentest (v_{La3}) und dem jeweiligen Modell-

parameter bestimmt. Folgende Hypothesen werden bei einseitigem Test auf dem α -Niveau von $\alpha = .05$ geprüft:

H₀6.1: Es besteht kein negativer Zusammenhang zwischen v_{ZF} und Parameter BF ($r = 0$).

H₁6.1: Zwischen v_{ZF} und Parameter BF besteht ein negativer Zusammenhang ($r < 0$).

H₀6.2: Es besteht kein negativer Zusammenhang zwischen v_{ZF} und dem Produkt $(AF - 1) * BF$ ($r = 0$).

H₁6.2: Zwischen v_{ZF} und dem Produkt $(AF - 1) * BF$ besteht ein negativer Zusammenhang ($r < 0$).

H₀6.3: Es besteht kein positiver Zusammenhang zwischen v_{ZF} und Parameter APR_{max} ($r = 0$).

H₁6.3: Zwischen v_{ZF} und Parameter APR_{max} besteht ein positiver Zusammenhang ($r > 0$).

H₀6.4: Es besteht kein negativer Zusammenhang zwischen v_{ZF} und dem Parameter VA ($r = 0$).

H₁6.4: Zwischen v_{ZF} und Parameter VA besteht ein negativer Zusammenhang ($r < 0$).

Entsprechende statistische Hypothesen werden auch für die mittels Lauftest ermittelte Leistungsfähigkeit v_{La3} aufgestellt (**H₀7.1** bis **H₀7.4** bzw. **H₁7.1** bis **H₁7.4**). Wegen der analogen Struktur zu den obigen Hypothesen werden sie an dieser Stelle jedoch nicht nochmals explizit formuliert.

4.3.6.4 Ergebnisse

Tab. 5 zeigt die Korrelationskoeffizienten für die statistischen Zusammenhänge zwischen der Leistungsfähigkeit (v_{ZF} und v_{La3}) und den Modellparametern. Lediglich

bezüglich des Hypothesenpaares $H_0/H_{16.2}$ fällt die Entscheidung bei dem gewählten α -Niveau von $\alpha = .05$ zugunsten der Alternativhypothesen aus. Es besteht demnach wie erwartet ein hoher negativer Zusammenhang zwischen der Zeitfahrleistung und dem Produkt $(AF - 1) * BF$ (s. Abb. 22).

Für die Hypothesenpaare $H_0/H_{17.2}$ und $H_0/H_{17.3}$ können die Nullhypothesen nur bei einer Wahl von $\alpha = .10$ verworfen und entsprechend die Alternativhypothesen angenommen werden. Dieses Ergebnis weist auf tendenzielle Zusammenhänge der Laufleistung bei einem Laktatwert von 3 mmol/l (v_{La3}) und den Parametern $(AF - 1) * BF$ und APR_{max} hin. Die Zusammenhänge fallen in der erwarteten Richtung aus: Zwischen v_{La3} und $(AF - 1) * BF$ besteht ein tendenzieller negativer Zusammenhang (s. Abb. 23), zwischen v_{La3} und APR_{max} ein tendenzieller positiver Zusammenhang (s. Abb. 24).

Bezüglich der übrigen Hypothesenpaare fällt die Entscheidung zugunsten der Nullhypothesen aus; es bestehen also keine weiteren signifikanten Zusammenhänge zwischen den Leistungsvariablen v_{ZF} bzw. v_{La3} und den übrigen Modellparametern.

Tab. 5: Korrelationen zwischen Modellparametern und der Leistung im Einzelzeitfahren (v_{ZF}) bzw. der Laufgeschwindigkeit an der 3 mmol/l-Laktatschwelle (v_{La3}) zu Untersuchung 3

Parameter	v_{ZF}		v_{La3}	
	r	p (1-seitig)	r	p (1-seitig)
BF	-.06 ns	.453	-.11 ns	.410
$(AF - 1) * BF$	-.87 *	.005	-.56 T	.094
APR_{max}	.34 ns	.226	.56 T	.095
VA	-.10 ns	.417	-.17 ns	.361

*: $p < .05$; T: $p < .10$; ns: nicht signifikant; $n = 7$

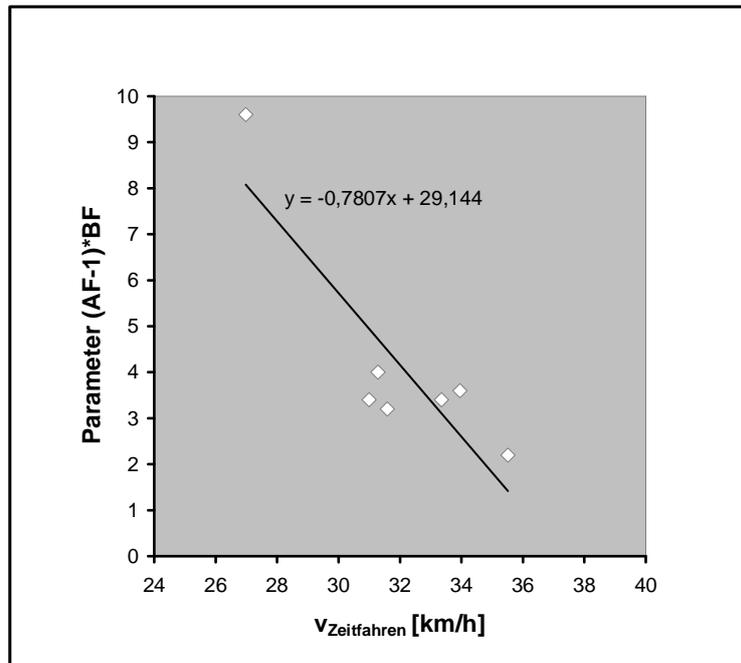


Abb. 22: Zusammenhang zwischen Modellparameter (AF-1)*BF und der Geschwindigkeit im Zeitfahren (v_{ZF})

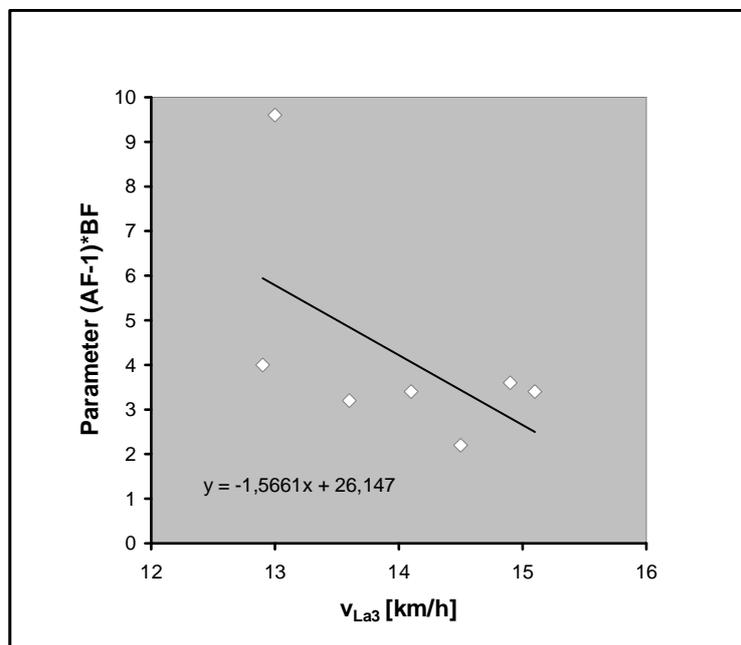


Abb. 23: Zusammenhang zwischen Modellparameter (AF-1)*BF und der Laufgeschwindigkeit an der 3 mmol/l-Laktatschwelle (v_{La3})

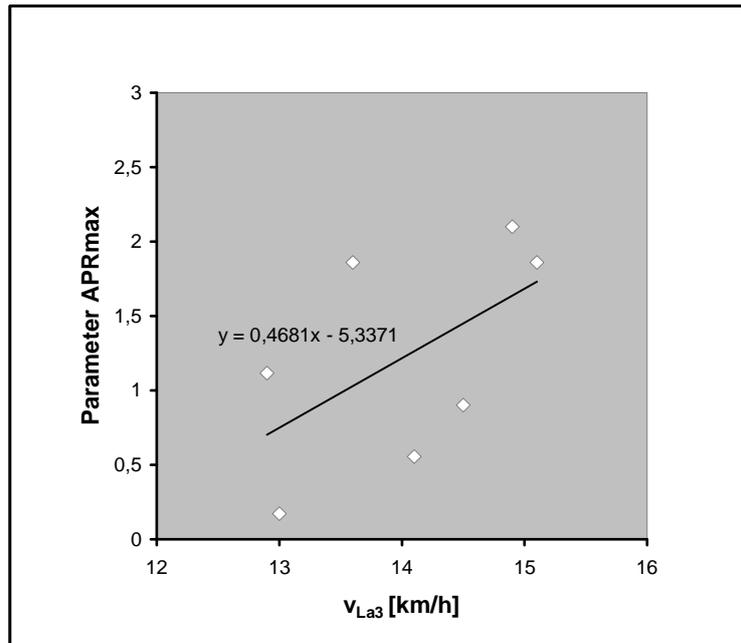


Abb. 24: Zusammenhang zwischen Modellparameter APR_{max} und der Laufgeschwindigkeit an der 3 mmol/l-Laktatschwelle (v_{La3})

Hypothese 6, wonach Parameterausprägungen von der Leistungsfähigkeit abhängen sollen, findet nur z.T. Bestätigung durch die vorliegenden Ergebnisse. Im Folgenden wird auf dieses Untersuchungsergebnis näher eingegangen.

4.3.6.5 Diskussion

Geprüft wurde, ob Zusammenhänge zwischen der Leistungsfähigkeit der Athleten und den Werten verschiedener Modellparameter bestehen, die sich als Ergebnis der simulationsbasierten Kalibrierung des SimBEA-Modells an Belastungs- und Leistungsdaten der Sportler ergeben. Für zwei der vier Modellparameter ergeben sich signifikante oder tendenzielle Zusammenhänge zur Leistungsfähigkeit:

Parameter $(AF - 1) * BF$ korreliert negativ mit der Radleistung und tendenziell negativ mit der Laufleistung. Je leistungsfähiger ein Athlet, desto geringer ist im Modell die Anpassung an eine Trainingsbelastung, nachdem sich der Athlet vom Training vollständig erholt hat. Da leistungsstärkere Athleten allgemein ihre Leistung nur in geringerem Ausmaß durch Training steigern können (vgl. Letzelter, 1978), und die Korrelationen von $(AF - 1) * BF$ zur Leistungsfähigkeit genau dieses ausdrücken, bestätigt sich in diesem Punkt die Struktur des Modells.

Allgemein ist davon auszugehen, dass leistungsstärkere Athleten belastbarer sind und höhere Trainingsbelastungen verarbeiten können (Jakowlew, 1976). Insbesondere wird eine hohe Grundlagenausdauerfähigkeit, die sich wie im vorliegenden Fall über die v_{La3} messen lässt, als Voraussetzung für eine gute Erholungsfähigkeit angesehen. Der tendenzielle Zusammenhang zwischen der v_{La3} und der maximalen Erholungs- bzw. Anpassungsrate des Modells (APR_{max}) zeigt, dass sich auch bei der SimBEA-Modellierung die bekannten Zusammenhänge zeigen: Je höher die Leistungsfähigkeit eines modellierten Athleten ist, desto größere Belastungen können bei der Modellierung bewältigt werden, ohne die maximale Regenerations- bzw. Anpassungsfähigkeit zu überschreiten. Dieses Ergebnis kann demnach (mit gewissen Einschränkungen wegen des lediglich tendenziellen Zusammenhangs) als Bestätigung der Modellannahme zur maximalen Syntheserate angesehen werden.

Soweit bestätigen die ermittelten Korrelationskoeffizienten im Sinne der Konstruktvalidität die Gültigkeit der Modellstruktur. Dabei sind die signifikanten Zusammenhänge nach den Bewertungsmaßstäben von Bortz und Döring (1995) als hohe Validitätskoeffizienten anzusehen. Die tendenziellen Zusammenhänge zeigen darüber hinaus eine mittlere Validität an.

Für die Parameter VA und BF ist in dieser Untersuchung kein Zusammenhang zur Leistungsfähigkeit nachweisbar. Dieser Befund bestätigt damit zwar nicht die Validität der Modellstruktur, er unterstreicht aber die Notwendigkeit, im Training individuelle Besonderheiten bei der Erholung und der Belastungsverarbeitung zu berücksichtigen: Wenn keine Zusammenhänge zwischen Leistungsfähigkeit und Erholungsdauer sowie Anpassungsdauer bestehen, dann müssen ergänzend zur üblichen Laktatleistungsdiagnostik noch andere Informationen und Verfahren herangezogen werden, um Belastungs- und Erholungsphasen im Training zu planen. Der hier gewählte Modellansatz stellt in diesem Sinne eine Möglichkeit zur Verfügung, trainingsbegleitend im Einzelfall die Erholungs- und Anpassungsgeschwindigkeit zu bestimmen, um diese dann bei der modellgestützten Trainingsplanung zu berücksichtigen.

Kritisch sei abschließend der geringe Stichprobenumfang der Untersuchung von $n = 7$ Athleten und der kurze Untersuchungszeitraum hervorgehoben: Sowohl hinsichtlich der signifikanten als auch hinsichtlich der nicht signifikanten Korrelationen ist

deshalb Vorsicht bei der Interpretation der diesbezüglichen Befunde geboten. Die signifikanten Korrelationen sollten durch Untersuchungen mit größerer Athletenzahl bestätigt werden. Dabei ließe sich dann ebenfalls prüfen, ob bezüglich der anderen Parameter nicht doch Zusammenhänge zur Leistungsfähigkeit bestehen, die im Rahmen dieser Kleingruppenuntersuchung nicht aufzudecken waren. Außerdem sollte auch der Untersuchungszeitraum länger gewählt werden, um dadurch die Zuverlässigkeit der Parameterbestimmung zu erhöhen.

4.4 Zusammenfassende Diskussion

Ziel der empirischen Untersuchung war es, zu prüfen, ob sich das SimBEA-Modell zur Simulation der belastungsabhängigen Leistungsveränderung in der Trainingspraxis einsetzen lässt. Die dafür aufgestellten operationalisierten Hypothesen konnten weitgehend bestätigt werden. Nur in Ausnahmefällen bestehen Vorbehalte oder Einschränkungen bei der Bestätigung der aufgestellten Hypothesen, insbesondere bei Hypothese 5.2 (siehe 4.3.5.2) und Hypothese 6 (siehe 4.3.6). So bleibt abschließend zu fragen: Ist das SimBEA-Modell damit zur Simulation von Anpassungsprozessen geeignet, und worauf ist dabei zu achten?

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich das SimBEA-Modell durch trainingsbegleitende Belastungs- und Leistungserfassung über das Verfahren der simulationsbasierten Kalibrierung zuverlässig kalibrieren lässt. Die Wahl der Datenpunkte ist für die Zuverlässigkeit der Modellanpassung dabei nicht von Bedeutung. Die Güte der Modellanpassung an die realen Leistungsdaten (hier die HF_{AST}) ist bei sechswöchiger Simulationsdauer (Untersuchung 1) sehr gut und bei Langzeitsimulationen (Untersuchung 2) immerhin annehmbar. Ebenso sind kurzzeitige Prognosen der Leistungsentwicklung mit hoher Gültigkeit simulierbar, wenn die Datenbasis zur Kalibrierung ausreichend groß ist. Für einwöchige Prognosen sind mindestens dreiwöchige Kalibrierungsphasen erforderlich.

Bei längeren Prognosen von über drei Wochen bis hin zu 28 Wochen und bei großem Abstand zwischen Kalibrierungs- und Prognosephase besitzt das Modell eine mittlere prognostische Validität. Unter diesen Bedingungen liefert das SimBEA-Modell damit immerhin Orientierungswerte, in welche Richtung die Leistungsentwicklung geht. Da bei der Simulation über sechs Wochen eine sehr hohe

Übereinstimmung zwischen Realverhalten und Modellverhalten vorliegt, können die geringeren Übereinstimmungsgrade bei längeren Prognosen und Modellierungen möglicherweise auf eine nur mittlere Stabilität des Modellverhaltens bzw. der Parameter hindeuten. Denkbar ist ebenso, dass sich die Parameter auch systematisch mit den Veränderungen der Leistungsfähigkeit verändern. Der personenübergreifende Zusammenhang zwischen einzelnen Modellparametern und der Leistungsfähigkeit (Fragestellung 6) kann als Indiz dafür angesehen werden, dass möglicherweise auch intraindividuell derartige Zusammenhänge bestehen. Über entsprechend angelegte Untersuchungen mit größerer Fallzahl und Untersuchungsdauer wäre diese Vermutung weiter zu prüfen. Im Fall einer Bestätigung dieser Hypothese und einer entsprechenden Modellanpassung könnte die Prognosegüte dann vielleicht auch bei längeren Simulationen und Prognosen erhöht werden.

Derzeit sind mittel- und langfristige Prognosen, die über eine Woche hinaus gehen, dagegen vor dem Hintergrund einer mittleren Validität zurückhaltend zu interpretieren. Regelmäßige Überprüfungen der Prognosegüte sind beim trainingsbegleitenden Einsatz des SimBEA-Modells daher zu empfehlen. Die Daten zur Überprüfung ließen sich dann jeweils auch zur Nachjustierung des Modells nutzen, um die Prognosegüte zu erhöhen.

In jedem Fall ist beim praktischen Einsatz des Modells zu beachten, dass die hier gefundenen Zusammenhänge zur Reliabilität und Validität des SimBEA-Modells überwiegend aus zwei Untersuchungen am Einzelfall stammen. Die Gültigkeit der Erkenntnisse ist damit auf den Einzelfall beschränkt. Soll das SimBEA-Modell in der Praxis eingesetzt werden, dann ist für den entsprechenden Athleten in jedem Fall eine spezielle Kalibrierung und Prüfung des Modells erforderlich. Das gilt auch, wenn andere Verfahren zur Belastungs- und Leistungsmessung genutzt werden bzw. andere Faktoren der Leistungsfähigkeit modelliert werden. Auch die Ergebnisse der Gruppenuntersuchung sind insbesondere wegen der kleinen Stichprobe nur eingeschränkt auf andere Personen übertragbar. Vorher sollten sie durch entsprechende Befunde an größeren Stichproben bestätigt werden. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse erscheinen weitere langfristig angelegte Untersuchungen lohnenswert.

Diese Untersuchungen sollten nicht nur der weiteren Validierung des SimBEA-Modells dienen. Ziel sollte es auch sein, das Verfahren der Modellanpassung an die

individuellen Bedingungen zu erleichtern. Denn für die simulationsbasierte Kalibrierung sind derzeit noch in großer Zahl Zustandsdaten des Athleten zu erheben. Wenn darüber hinaus auch noch mehrere Teilsysteme modelliert werden sollen, steigt der Datenbedarf weiter an und stellt damit die praktische Einsetzbarkeit des Modells erheblich in Frage. Auf die Entwicklung und Prüfung geeigneter, d.h. trainingsbegleitend leicht durchführbarer und wenig belastender Verfahren der Datenerhebung sollte zukünftig deshalb besonders geachtet werden.

Aufgrund der signifikanten Zusammenhänge zwischen einigen Modellparametern und der sportlichen Leistungsfähigkeit (Fragestellung 6) wäre es darüber hinaus interessant zu prüfen, ob bei bekannter Leistungsfähigkeit über entsprechende statistische Vorhersagen der Modellparameter eine Erst-Kalibrierung des SimBEA-Modells möglich ist. Diese Erst-Kalibrierung ließe sich dann möglicherweise anhand weniger weiterer Leistungsdaten individuell optimieren, so dass mit wenigen Leistungswerten eine individuelle Modellanpassung möglich wäre.

5 ANWENDUNGSBEISPIELE FÜR DAS SIMBEA-MODELL IN DER TRAININGSSTEUERUNG

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zeigen, dass das SimBEA-Modell Anpassungsprozesse an Belastungen simulieren kann und dass dabei auch weitgehend hohe Übereinstimmungen zwischen realen und simulierten Werten erreicht werden. Wie lässt sich das Modell nun im praktischen Training einsetzen, um das Training zu optimieren? Zwei Anwendungsbeispiele werden im Folgenden gegeben. Das erste betrifft den Einsatz des SimBEA-Modells zur retrospektiven Analyse des bereits absolvierten Trainings, das zweite bezieht sich auf die prospektive Trainingswirkungssimulation bei der Trainingsplanung und die Ermittlung des optimalen Belastungsumfangs. In beiden Beispielen wird das an den Einzelfall 1 (Untersuchung 1) kalibrierte SimBEA-Modell zur Simulation benutzt.

5.1 Retrospektive Trainingsanalyse

Zur Analyse der Belastungs- und Anpassungsreaktionen an das absolvierte Training sind insbesondere die Anpassungsraten (APR) während der Trainingsphase im Vergleich zur maximalen Anpassungsrate des Modells bzw. des Athleten (APR_{max}) zu betrachten. Jede Belastung führt zur unmittelbaren Abnahme der Leistungsfähigkeit (hier entsprechend zum Anstieg der im Ausdauer-Standard-Test ermittelten HF_{AST}). Anschließend findet die Regeneration und Anpassung statt. Ein maximaler Trainingsgewinn tritt nur dann ein, wenn die maximale Anpassungsrate nicht überschritten wird. Sobald die maximale Anpassungsrate erreicht wird, geht ein Teil des Anpassungspotentials und damit des theoretisch möglichen Trainingsgewinns verloren. Eine geringere Belastung hätte damit u.U. bei geringerem Leistungsabbau den gleichen positiven Effekt und damit letztlich eine höhere Leistungsfähigkeit bewirkt.

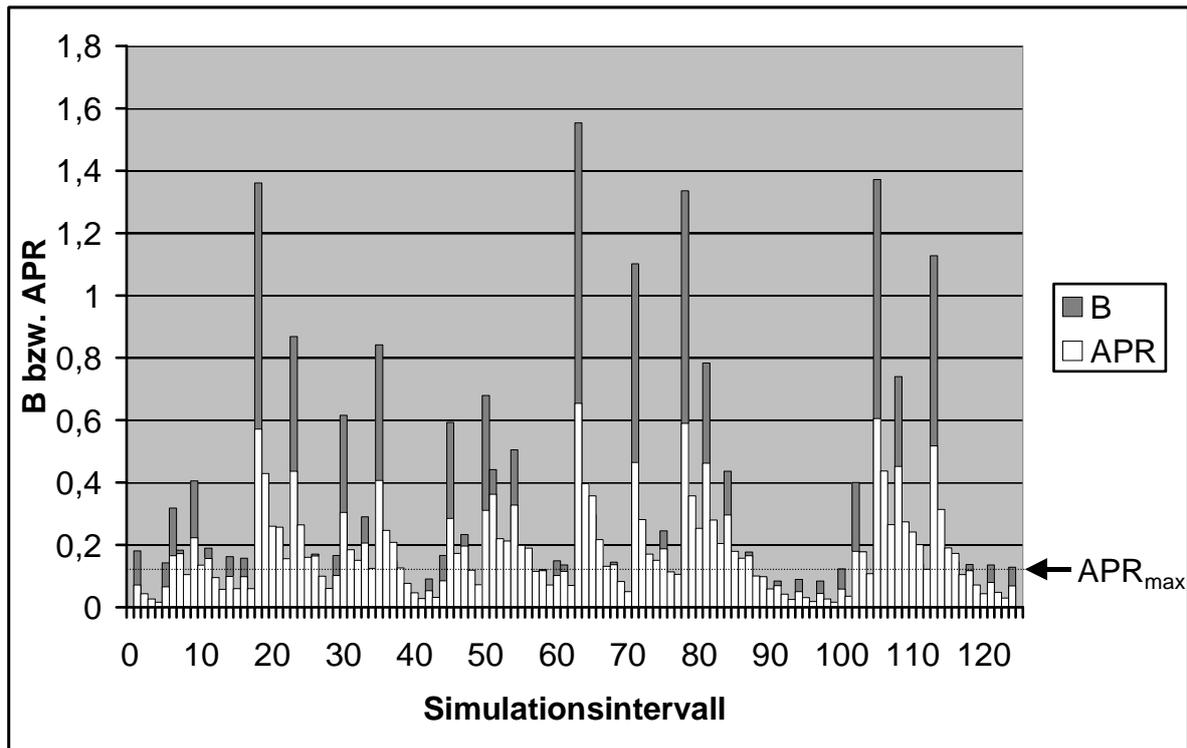


Abb. 25: Dynamik der Belastung (B, im Hintergrund dargestellt) und der Anpassungsraten (APR, im Vordergrund dargestellt) für alle Simulationsintervalle von Untersuchung 1 (?t = 8 h)

Abb. 25 zeigt die theoretischen Anpassungsraten (APR) während des untersuchten Trainingsabschnitts von Untersuchung 1 und die maximale Anpassungsrate (APR_{max}). Mehrfach wird die APR_{max} überschritten. Hier wirkt dann nur der Betrag APR_{max} positiv auf die Leistungsfähigkeit ein. Niedrigere Belastungen hätten hier eine bessere Leistungsentwicklung ermöglicht. Andererseits zeigen Anpassungsraten, die deutlich unter der maximalen Anpassungsrate liegen, dass jeweils im Vorfeld dieser niedrigen Anpassungsraten noch zusätzliche oder höhere Belastungen möglich gewesen wären, ohne dass es im System zur Überlastung gekommen wäre. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass andere Funktionssysteme, die vom Ausdauer-Standard-Test und damit vom Modell nicht erfasst werden, durch diese Belastungserhöhung möglicherweise überfordert würden. Insbesondere ist hierbei an den sich nur langsam adaptierenden passiven Bewegungs- und Stützapparat zu denken. Eine Trainingsökonomisierung durch gezielte Belastungsreduzierung ist einer Belastungssteigerung wegen des geringeren Überlastungsrisikos deshalb als Strategie zur Leistungsoptimierung erstmal vorzuziehen.

Abb. 26 zeigt, wie sich die Verringerung einiger Einzelbelastungen positiv auf die Leistungsentwicklung ausgewirkt hätte. Dabei wurden die Belastungsspitzen

(insgesamt sechs Belastungswerte) nachträglich auf einen Höchstwert von Eins reduziert. Gegenüber der ursprünglichen Simulation fällt die HF_{AST} am Ende der Simulation ($t = 124$) dann auf den Wert 141 Schläge/min statt vorher 147 Schläge/min. Bei geringerer Trainingsbelastung ist damit eine größere Leistungssteigerung des modellierten Systems zu verzeichnen.

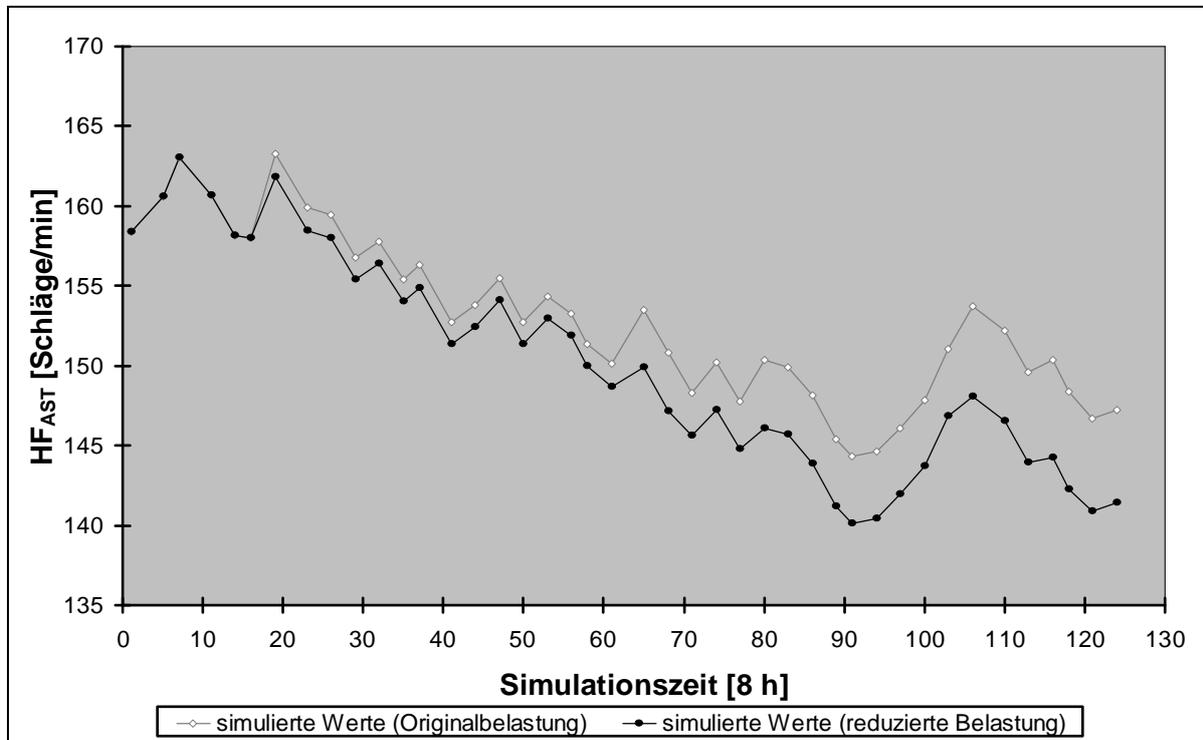


Abb. 26: Verlauf der simulierten Leistungsentwicklung für die Originalbelastung von Untersuchung 1 und die reduzierte Belastung

Über ein weiteres SimBEA-Modell, das bspw. an Parameter des Belastungsstoffwechsels angepasst sein müsste, ließe sich abschätzen, welchen Effekt diese Belastungsreduzierung auf das Stoffwechselgeschehen, z.B. auf die Höhe der anaeroben Schwelle gehabt hätte. Möglich wäre sowohl ein positiver Effekt im Sinne einer Vermeidung von Überforderung als auch ein Rückgang der Leistungsfähigkeit durch den geringeren Trainingsreiz. Einem solchen Leistungsabfall wäre dann durch eine entsprechende Belastungssteigerung bei anderen Trainingseinheiten vorzubeugen gewesen. Kurzum: Je mehr Aspekte der sportlichen Leistungsfähigkeit und der Belastbarkeit eines Athleten durch entsprechende Modelle erfasst werden, umso umfassender lässt sich das Training im Hinblick auf Über- und Unterforderung analysieren und damit zukünftig optimieren.

5.2 Prospektive Trainingswirkungssimulation

Die Literatur zur Trainingsmethodik liefert viele Ansätze zur systematischen Organisation des Trainings, insbesondere für die Ausdauersportarten (z.B. Hottenrott & Zülch, 1995; Neumann et al. 1998; Sleamaker, 1996). Kennzeichen dieser Trainingskonzeptionen sind u.a. eine allmählich ansteigende Belastung und ein planmäßiger Wechsel von Belastungs- und Entlastungsphasen. Beide Trainingsprinzipien werden dabei sowohl innerhalb der einzelnen Trainingswochen (Mikrozyklen) als auch innerhalb der längeren Trainingsabschnitte (Meso- und Makrozyklen) angewendet. Die längeren Entlastungsphasen dienen dabei der umfassenden Regeneration und der Funktionsoptimierung und Abstimmung aller leistungssichernden Systeme (Neumann, Feustel & Schober, 1991). Am Beispiel des Trainingskonzepts von Sleamaker (1996) soll gezeigt werden, wie sich das SimBEA-Modell in Verbindung mit den genannten trainingsmethodischen Konzepten bei der Trainingsplanung einsetzen lässt.

Sleamaker (1996) geht beim Festlegen der Trainingsbelastungen sehr systematisch vor: Für die Gesamtjahresbelastung wird ein Verteilungsschlüssel auf die Vier-Wochen-Abschnitte des Trainingsjahrs festgelegt. Aus der geplanten Jahresbelastung ergeben sich daraus die Belastungen eines jeden Vier-Wochen-Abschnitts. Entsprechend wird dann die prozentuale Verteilung dieser Belastungen auf die einzelnen Wochen festgelegt (s. Abb. 27), woraus sich jeweils die wöchentliche Gesamtbelastung ermitteln lässt. Aus diesen Belastungsdaten für jede Woche ergibt sich wiederum nach einem Verteilungsschlüssel die tägliche Belastungshöhe (s. Abb. 28). Die prozentuale Verteilung der Belastung innerhalb der Vier-Wochen-Abschnitte und innerhalb der Trainingswochen stellt eine Belastungsprogression bei gleichzeitigem Wechsel von Be- und Entlastungsphasen sicher (s. Abb. 29).

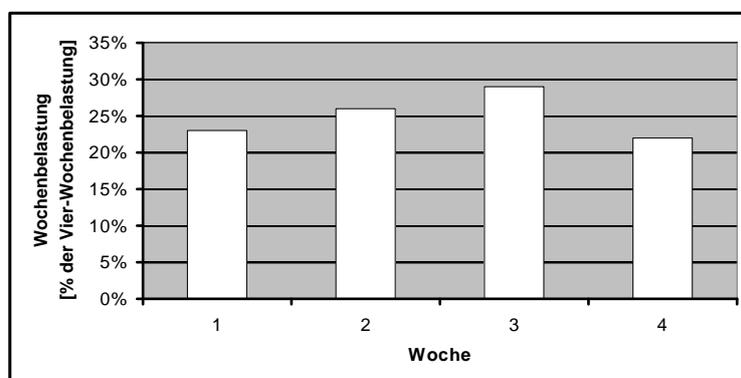


Abb. 27: Verteilung der Vier-Wochenbelastung auf die einzelnen Wochen

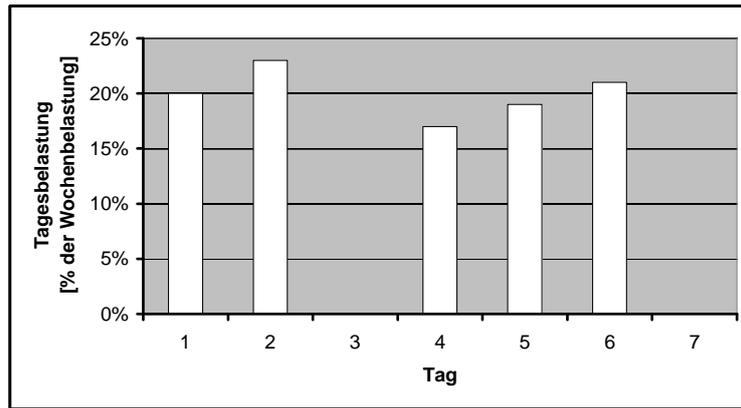


Abb. 28: Verteilung der Wochenbelastung auf die einzelnen Wochentage

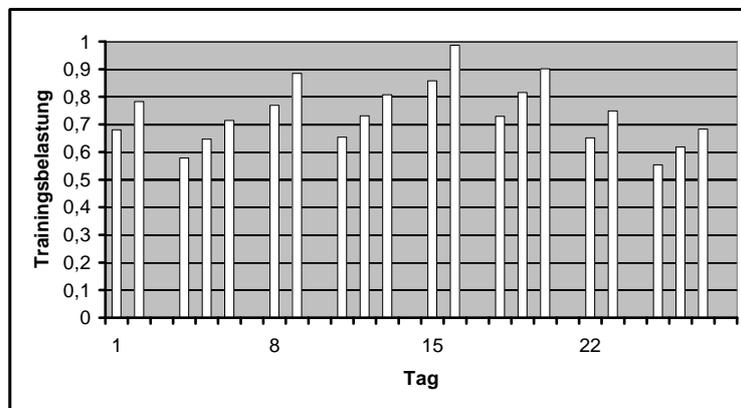


Abb. 29: Dynamik der Tagesbelastungen im Vier-Wochenabschnitt nach Sleamaker (1996) für eine Gesamtbelastung von 15 Belastungseinheiten

Für ein entsprechendes Vier-Wochen- und Wochen-Schema der Belastungsverteilung wird mit dem SimBEA-Modell nun der optimale Belastungsumfang ermittelt. Benutzt wird wiederum das an Einzelfall 1 kalibrierte Modell. Ausgehend von der bei Untersuchung 1 absolvierten und auf vier Wochen umgerechneten Durchschnittsbelastung von 15 Belastungseinheiten wird die Leistungsentwicklung für 50 %, 60 %, ... 200 % dieser Ausgangsbelastung berechnet. Die Höhe der Leistungsfähigkeit wird dabei über den modellierten HF_{AST} -Wert bestimmt, also über die bei submaximaler Standardbelastung ermittelte Herzfrequenz am 28. Tag der Simulation. Die Leistungsentwicklung in Abhängigkeit von der Gesamtbelastung ist in Abb. 30 dargestellt. Niedrige Herzfrequenzwerte entsprechen wiederum einer hohen Leistungsfähigkeit. Es zeigt sich ein U-förmiger Zusammenhang zwischen der HF_{AST} und der Gesamtbelastung im Vier-Wochen-Abschnitt. Entsprechend besteht

zwischen der Leistungsfähigkeit und der Gesamtbelastung ein umgekehrt-U-förmiger Zusammenhang, ähnlich wie er auch beim LeiPot-Modell auftritt (Mester & Perl, 2000).

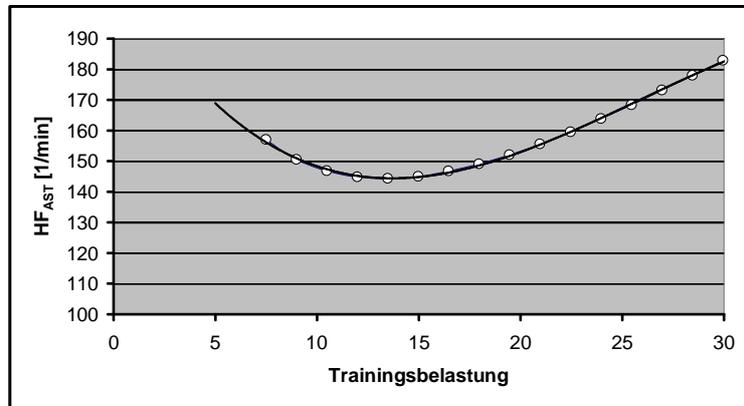


Abb. 30: Simulierte HF_{AST} nach vier Trainingswochen in Abhängigkeit von der Gesamtbelastung im Vier-Wochenabschnitt

Zur Bestimmung der optimalen Trainingsbelastung wird der Kurvenverlauf über ein Polynom dritten Grades angenähert und das Minimum bestimmt:

$$HF_{AST} = -0.0072 * B^3 + 0.5558 * B^2 - 11.187 * B + 211.82 \quad (r = 1.00)$$

Der minimale HF_{AST}-Wert im untersuchten Belastungsbereich liegt bei 144 Schlägen/min und bei einer Gesamtbelastung von 13.7 Belastungseinheiten. Für das angewendete Belastungsschema ist bei dieser Belastung also die beste Leistungsentwicklung zu erwarten. Die optimale Belastung liegt damit unter der mittleren Belastung von 15 Belastungseinheiten des Trainings bei Untersuchung 1. Eine Belastungsreduktion gegenüber der ursprünglichen Belastung ist also für die Leistungsentwicklung günstiger.

Im Idealfall sollte bei der simulationsbasierten Ermittlung der optimalen Belastungswerte sicher das Anpassungsverhalten von mehreren leistungssichernden Systemen eines Athleten Berücksichtigung finden. Neben der Herz-Kreislauf-Anpassung wäre es in Ausdauersportarten beispielsweise wichtig, auch Anpassungsprozesse des Stoffwechsels und des Stützapparates zu berücksichtigen. Hierzu wären weitere Modelle an entsprechenden individuellen Messwerten der betreffenden Systeme zu kalibrieren und das Systemverhalten wie im vorliegenden Fall zu analysieren. Aus diesen Analysen ließen sich dann umfassendere Schlussfolgerungen für die Gestaltung der Trainingsbelastung ziehen. Doch auch diese

einfache Variante zeigt schon, wie sich das SimBEA-Modell in Verbindung mit traditionellen Ansätzen für eine optimierte Belastungsplanung einsetzen lässt.

5.3 Abschließende Bemerkung

Beim SimBEA-Modell handelt es sich um ein vergleichsweise einfaches Modell zur Simulation von Anpassungsprozessen an sportliches Training, einfach jedenfalls in Relation zu den realen Prozessen, die dabei im menschlichen Körper ablaufen. Trotzdem lassen sich über das Modell Anpassungsvorgänge relativ gut simulieren, analysieren und prognostizieren, wie es die insgesamt erfolgreiche Modellprüfung in dieser Arbeit gezeigt hat. Damit dürfte das SimBEA-Modell durchaus ein praktikables Hilfsmittel für den Trainer sein, das dazu beitragen kann, begründete Entscheidungen im Zuge einer Trainingsplanung und -steuerung zu treffen.

Und dennoch werden sich über dieses und andere Modelle natürlich nicht alle Fragen einer einzig richtigen Trainingsgestaltung vorab beantworten lassen. Insofern bleibt die Planung im Sport nach wie vor in Teilen auch ein künstlerischer Prozess – ganz im Sinne des an den Anfang gestellten Zitats von Verchoshanskij (1988) – weil auf die schöpferische Initiative des fachkundigen Trainers bei der Entscheidung des konkreten Einzelfalls niemals verzichtet werden kann.

ZUSAMMENFASSUNG

Aufgegriffen wird die Idee der modellgestützten Simulation von Trainingsanpassungen. Vorgestellt und diskutiert werden das Modell von Banister et al. (1975), das mathematische Modell der Proteinbiosynthese von Mader (1990) und das Metamodell LeiPot von Perl (Mester & Perl, 2000). Ausgehend von diesen Modellen wird ein eigenes Modell zur Simulation von Belastungs-, Ermüdungs- und Anpassungsprozessen hergeleitet. Dieses SimBEA-Modell lässt sich anhand von Trainingsdaten zur Belastung und Leistungsfähigkeit individuell kalibrieren, so dass es die personenspezifischen Reaktionsweisen eines Athleten simulieren kann. Ziel der weiteren Arbeit ist die Prüfung des Modells. Hierzu werden zwei trainingsbegleitende Einzelfalluntersuchungen mit einem leistungsorientiert trainierenden Läufer über sechs bzw. 68 Wochen sowie eine Kleingruppenuntersuchung ($n = 7$) mit D-Kader-Triathleten während eines 12-tägigen Trainingslagers durchgeführt. Die trainingsbegleitende Erfassung des Anpassungs- und Ermüdungszustandes erfolgt über ein an den Ausdauer-Standard-Test (AST) (Hottenrott, 1993) angelehntes Verfahren. Mit den Kaderathleten werden zusätzlich ein Laktatstufentest im Laufen und ein Einzelzeitfahren durchgeführt. Die Modellgüte wird über die Pearson- bzw. die Intraclass-Korrelation (r_{ICC}) beurteilt. Unabhängig von der gewählten Datenbasis lässt sich das SimBEA-Modell zuverlässig kalibrieren ($r_{ICC} = .92$ bzw. $.93$, $p < .001$). Für die Modellanpassung an den über den AST gemessenen Trainingszustand ergeben sich hohe Validitäten von $r_{ICC} = .86$ bzw. $.65$ ($p < .001$). Nach mindestens dreiwöchiger Kalibrierung des SimBEA-Modells ergeben sich für einwöchige Prognosen im Mittel prognostische Validitäten über $r = .84$. Mittelfristige Prognosen ($r = .52$, $p < .10$; $r = .54$, $p < .01$) und langfristige Prognosen ($r = .55$, $p < .001$) sind mit mittlerer Validität möglich. Für zwei Modellparameter ergeben sich in der Gruppenuntersuchung mittlere ($r = .56$, $p < .10$ und $r = -.56$, $p < .10$) und hohe ($r = -.87$, $p < .01$) Zusammenhänge zur über Laktatstufentest und Einzelzeitfahren gemessenen Leistungsfähigkeit. Dies wird als Bestätigung der Modellstruktur gewertet. Insgesamt verläuft die Modellprüfung positiv. Diskutiert werden Verbesserungs- und Erweiterungsmöglichkeiten des Modells sowie weiterer Untersuchungsbedarf. Zwei abschließende Beispiele zeigen Einsatzmöglichkeiten des SimBEA-Modells in der Trainingssteuerung, die sich auf die Analyse von Trainingsprozessen sowie auf die Simulation von Trainingswirkungen bei der Trainingsplanung beziehen.

LITERATUR

- Banister, E. W., Calvert, I. W., Savage, M. V. & Bach, I. M. (1975). A system model of training for athletic performance. *Australian Journal of Sports Medicine*, 7(3), 57-61.
- Banister, E. W., Carter, J. B. & Zarkadas, P. C. (1999). Training theory and taper: validation in triathlon athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 79, 182-191.
- Banister, E. W., Good, P., Holman, G. & Hamilton, C. L. (1986). Modeling the training response in athletes. In D. M. Landers (Ed.), *1984 Olympic Scientific Congress proceedings; v. 3. Sport and elite performers* (pp. 7-23). Champaign: Human Kinetics.
- Banister, E. W. & Hamilton, C. L. (1985). Variations in iron status with fatigue modelled from training in female distance runners. *European Journal of Applied Physiology*, 54(1), 16-23.
- Boiko, V. V. (1990). *Die gezielte Entwicklung der Bewegungsfähigkeit des Sportlers*. Frankfurt: Deutscher Sportbund.
- Borg, G. (1985). *An introduction to Borgs RPE-scale*. Ithaca: Mouvement.
- Bortz, J. (1993). *Statistik für Sozialwissenschaftler* (4., vollst. überarb. Aufl.). Berlin: Springer.
- Bortz, J. & Döring, N. (1995). *Forschungsmethoden und Evaluation für Sozialwissenschaftler* (2., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl.). Berlin: Springer.
- Bühl, A. & Zöfel, P. (2000). *SPSS Version 10. Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows* (7., überarb. u. erweit. Aufl.). München: Addison-Wesley.
- Busso, T., Benoit, H., Bonnefoy, R., Feasson, L. & Lacour, J. R. (1997). Modeling of adaptations to physical training by using a recursive least squares algorithm. *Journal of Applied Physiology*, 82, 1685-1693.
- Busso, T., Benoit, H., Bonnefoy, R., Feasson, L. & Lacour, J. R. (2002). Effects of training frequency on the dynamics of performance response to a single training bout. *Journal of Applied Physiology*, 92, 572-580.

- Candau, R., Busso, T. & Lacour, J. R. (1992). Effects of training on iron status in cross-country skiers. *European Journal of Applied Physiology*, 64(6), 497-502.
- Fitz-Clarke, J. R., Morton, R. H. & Banister, E. W. (1991). Optimizing athletic performance by influence curves. *Journal of Applied Physiology*, 71, 1151-1158.
- Friedrich, W. & Moeller, H. (1999). Zum Problem der Superkompensation. *Leistungssport*, 29(5), 52-55.
- Goldspink, G. (1992). Cellular and molecular aspects of adaptation in skeletal muscle. In R. V. Komi (Ed.), *Strength and power in sport* (pp. 211-229). Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Grosser, M., Brüggemann, P. & Zintl, F. (1986). *Leistungssteuerung in Training und Wettkampf*. München: BLV.
- Heck, H. (1990). *Laktat in der Leistungsdiagnostik*. Schorndorf: Hofmann.
- Hettinger, T. (1966). *Isometrisches Muskeltraining* (2. Aufl.). Stuttgart: Thieme.
- Hohmann, A. (2005). Steuerung sportlicher Spitzenleistungen aus trainingswissenschaftlicher Perspektive. *Leistungssport*, 35(6), 56-62.
- Hohmann, A., Lames, M. & Letzelter, M. (2002). *Einführung in die Trainingswissenschaft*. Wiebelsheim: Limpert.
- Hollmann, W. & Hettinger, T. (1976). *Sportmedizin – Arbeits- und Trainingsgrundlagen*. Stuttgart: Schattauer.
- Hollmann, W. & Hettinger, T. (2000). *Sportmedizin: Grundlagen für Arbeit, Training und Präventivmedizin* (4., völlig neu bearb. Aufl.). Stuttgart: Schattauer.
- Hollmann, W. & Mader, A. (2000). Grenzen der Leistungsfähigkeit des Menschen aus physiologischer Sicht. *Leistungssport*, 30(1), 11-17.
- Hottenrott, K. (1993). *Trainingsteuerung im Ausdauersport: Theorien – Untersuchungen - Beispiele*. Ahrensburg: Czwalina.
- Hottenrott, K. & Zülch, M. (1995). *Ausdauerprogramme: Erfolgstraining für alle Sportarten*. Reinbek: Rowohlt.
- Israel, S. (1976). Zur Problematik des Übertrainings aus internistischer und leistungsphysiologischer Sicht. *Medizin und Sport*, 16(1), 1-12.

- Israel, S. (1995). Herzkreislaufsystem. In G. Badtke (Hrsg.), *Lehrbuch der Sportmedizin: Leistungsentwicklung, Anpassung, Belastbarkeit, Schul- und Breitensport* (3., neubearb. Aufl.) (S. 161-187). Leipzig: Barth.
- Jakowlew, N. N. (1976). Erweiterung des Regulationsbereichs des Stoffwechsels bei Anpassung an verstärkte Muskeltätigkeit. *Medizin und Sport* 16(3), 66-70.
- Jakowlew, N. N. (1977). *Sportbiochemie*. Leipzig: Barth.
- Letzelter, M. (1978). *Trainingsgrundlagen: Training, Technik, Taktik*. Reinbek: Rowohlt.
- Mader, A. (1990). Aktive Belastungsadaptation und Regulation der Proteinsynthese auf zellulärer Ebene. Ein Beitrag zum Mechanismus der Trainingswirkung und der Kompensation von funktionellen Mehrbelastungen von Organen. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 41(2), 40-58.
- Martin, D., Carl, K. & Lehnertz, K. (1993). *Handbuch Trainingslehre* (2., unveränd. Aufl.). Schorndorf: Hofmann.
- Matwejew, J. P. (1972). *Periodisierung des sportlichen Trainings*. Berlin: Bartels & Wernitz.
- Mester, J. & Perl, J. (2000). Grenzen der Anpassungs- und Leistungsfähigkeit des Menschen aus systemischer Sicht. *Leistungssport*, 30(1), 43-51.
- Millet, G. P., Candau, R. B., Barbier, B., Busso, T., Rouillon, J. D. & Chatard, J. C. (2002). Modelling the transfers of training effects on performance in elite triathletes. *International Journal of Sports Medicine*, 23, 55-63.
- Millet, G. P., Gros Lambert, A., Barbier, B., Rouillon, J. D. & Candau, R. B. (2005). Modelling the relationships between training, anxiety, and fatigue in elite athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 26, 492-498.
- Moroz, D. E. & Houston, M. E. (1987). The effects of replacing endurance running training with cycling in female runners. *Canadian Journal of Sports Sciences*, 12(3), 131-135.
- Morton, R. H., Fitz-Clarke, J. R. & Banister, E. W. (1990). Modeling human performance in running. *Journal of applied Physiology*, 69, 1171-1177.

- Mujika, I., Busso, T., Lacoste, L., Barale, F., Geysant, A. & Chatard, J. C. (1996). Modeled responses to training and taper in competitive swimmers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 28, 251-258.
- Neumann, G., Feustel, G. & Schober, F. (1991). Zur Erhöhung der Reizwirksamkeit der Trainingsbelastung. In M. Reiß & U. Pfeiffer (Hrsg.), *Leistungsreserven im Ausdauertraining*. Berlin: Sportverlag.
- Neumann, G., Pfützner, A. & Berbalk, A. (1998). *Optimiertes Ausdauertraining*. Aachen: Meyer & Meyer.
- Neumann, G., Pfützner, A. & Hottenrott, K. (2000). *Alles unter Kontrolle: Ausdauertraining* (6., überarb. Aufl.). Aachen: Meyer & Meyer.
- Perl, J. (1998). Anwendung der EDV in Sportmedizin und Sportwissenschaft: Entwicklung und Perspektiven. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 49(Sonderheft 1), 322-326.
- Perl, J. (2002 a). Adaptation, antagonism, and system dynamics. In G. Ghent, D. Kluka & D. Jones (eds.), *Sport and information technology. Perspectives*, 4 (pp. 105-125). Aachen: Meyer & Meyer.
- Perl, J. (2002 b). Physiologische Modelle der Adaptation. In J. Perl, M. Lames & U. Glitsch (Hrsg.), *Modellbildung in der Sportwissenschaft* (S. 162-178). Schorndorf: Hofmann.
- Perl, J. (2003). On the long term behaviour of the Performance-Potential-Metamodel PerPot: New results and approaches. *International Journal of Computer Science in Sport*, 2(1), 80-92. Zugriff am 25. Juli 2006 unter http://www.informatik.uni-mainz.de/perpot/Full2003__Perl_Longterm.pdf
- Perl, J. (2004). PerPot – a meta-model and software tool for analysis and optimisation of load-performance-interaction. *International Journal of Performance Analysis of Sport*, 4(2), 61-73.
- 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 Ed. 2003*, 12-21. Zugriff am 25. Juli 2006 unter http://www.informatik.uni-mainz.de/perpot/Full2003__Perl_Dauscher_Hawlitzky.pdf

- Perl, J. & Mester, J. (2001). Modellgestützte und statistische Analyse der Wechselwirkung zwischen Belastung und Leistung. *Leistungssport*, 31(2), 54-62.
- Perl, J. & Uthmann, T. (1997). Modellbildung. In J. Perl, M. Lames & W.-D. Miethling (Hrsg.), *Informatik im Sport: ein Handbuch* (S. 43-64). Schorndorf: Hofmann.
- Platonov, V. N. (1999). *Belastung-Ermüdung-Leistung: der moderne Trainingsaufbau*. Münster: Philippka.
- Rost, J. (1999). Test- und Fragebogenanalysen. In B. Strauß, H. Haag & M. Kolb (Hrsg.), *Datenanalyse in der Sportwissenschaft: hermeneutische und statistische Verfahren* (S. 455-480). Schorndorf: Hofmann.
- Ruby, B., Robergs, R., Leadbetter, G., Mermier, C., Chick, T. & Stark, D. (1996). Crosstraining between cycling and running in untrained females. *The Journal of Sports Medicine and physical Fitness*, 36(4), 246-254.
- Schlicht, W. (1994). Einzelfallanalysen. In B. Strauß & H. Haag (Hrsg.), *Forschungsmethoden – Untersuchungspläne – Techniken der Datenerhebung in der Sportwissenschaft: forschungsmethodologische Grundlagen* (S. 183-193). Schorndorf: Hofmann.
- Schnabel, G., Harre, D. & Borde, A. (Hrsg.). (1994). *Trainingswissenschaft: Leistung – Training - Wettkampf*. Berlin: Sportverlag.
- Selujanov, V. N. (1999). Die historisch-wissenschaftliche Einordnung der Konzeption der „Periodisierung des Trainings“ und ihrer Kritik. *Leistungssport*, 29(2), 13-14.
- Sleamaker, R. (1996). *Systematisches Leistungstraining: Schritte zum Erfolg* (2., überarb. Aufl.). Aachen: Meyer & Meyer.
- Thomas, L. & Busso, T. (2005). A theoretical study of taper characteristics to optimize performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37, 1615-1621.
- Tschiene, P. (1996). Konditionstraining – Theoriebildung nur auf der Basis von Adaptationsmodellen. Neue Entwicklung in der theoretischen Fundierung von Training. *Leistungssport*, 26(6), 13-17.

- Tschiene, P. (1997). Theorie des konditionellen Trainings: Belastungsklassifizierung und Methodenmodellierung unter adaptativem Aspekt. *Leistungssport*, 27(4), 21-25.
- Tschiene, P. (2006). Streit um die Superkompensation. *Leistungssport*, 36(1), 5-15.
- Verchoshanskij, J. (1988). *Effektiv trainieren. Neue Wege zur Planung und Organisation des Trainingsprozesses*. Berlin: Sportverlag.
- Verchoshanskij, J. (1992). *Ein neues Trainingssystem für zyklische Sportarten: ein neuer Weg der Gestaltung und Programmierung des Trainingsprozesses*. Münster: Philippka.
- Verchoshanskij, J. (1998). Das Ende der „Periodisierung“ des sportlichen Trainings im Spitzensport. *Leistungssport*, 28(5), 14-19.
- Verchoshanskij, J. & Viru, A. (1990). Einige Gesetzmäßigkeiten der langfristigen Adaptation des Organismus von Sportlern an körperliche Belastungen. *Leistungssport*, 20(3), 10-13.
- Weicker, H. & Strobel, G. (1994). *Sportmedizin: biochemisch-physiologische Grundlagen und ihre sportartspezifische Bedeutung*. Stuttgart: Gustav Fischer.
- Weineck, J. (1997). *Optimales Training: Leistungsphysiologische Trainingslehre unter besonderer Berücksichtigung des Kinder- und Jugendtrainings* (10. Aufl.). Balingen: Spitta.
- Wilhelm, A. (1995). *Belastung und Beanspruchung im Wettkampfsport. Einzelfallanalysen zum Verlauf und zur Interaktion von Befinden, Trainingsbelastung und Beanspruchungserleben im 400 m-Hürdenlauf*. Bonn: Holos.
- Zanon, S. (1999). Biologische oder pädagogische Priorität in der Theorie des Trainings? *Leistungssport*, 29(3), 22-23.
- Zatsiorsky, V. M. (1996). *Krafttraining – Wissenschaft und Praxis*. Aachen: Meyer & Meyer.
- Zintl, F. & Eisenhut, A. (2001). *Ausdauertraining. Grundlagen, Methoden, Trainingssteuerung* (5., überarb. Aufl.). München: BLV.

ANHANG

Tab. 6: Belastungsdaten zu Untersuchung 1

Datum und Zeit	Dauer	RPE	Disziplin	TI
24.05.2001 07:15	0:21	13	L	0,18
25.05.2001 08:35	0:20	12	L	0,14
25.05.2001 18:21	2:07	13	I	1,06
26.05.2001 07:57	0:22	13	L	0,18
26.05.2001 18:16	1:53	16	R	1,35
27.05.2001 09:05	0:22	13	L	0,19
28.05.2001 08:57	0:22	12	L	0,16
29.05.2001 07:45	0:22	12	L	0,16
29.05.2001 20:46	1:35	18	L	1,36
30.05.2001 07:55	0:22	14	L	0,21
30.05.2001 18:00	1:40	13	I	0,84
31.05.2001 08:19	0:22	13	L	0,19
31.05.2001 14:48	0:52	17	L	0,68
01.06.2001 09:59	0:20	13	L	0,17
02.06.2001 08:19	0:23	12	L	0,17
02.06.2001 20:19	0:57	15	L	0,62
03.06.2001 09:05	0:13	12	L	0,10
03.06.2001 17:37	1:01	10	L	0,29
04.06.2001 09:20	0:15	12	L	0,11
04.06.2001 14:28	1:08	15	L	0,73
05.06.2001 07:45	0:20	12	L	0,15
06.06.2001 18:07	0:12	12	L	0,09
07.06.2001 09:07	0:23	12	L	0,17
07.06.2001 16:11	1:23	12	L	0,59
08.06.2001 09:52	0:24	14	L	0,23
09.06.2001 08:24	0:23	13	L	0,19
09.06.2001 09:41	0:30	15	I	0,32
09.06.2001 13:20	2:01	15	I	1,30
09.06.2001 18:52	1:32	10	L	0,44
10.06.2001 09:19	0:21	14	L	0,20
10.06.2001 17:05	0:53	14	L	0,50
11.06.2001 09:52	0:18	14	L	0,18
12.06.2001 07:56	0:17	12	L	0,12
12.06.2001 22:01	1:23	11	I	0,50
13.06.2001 07:31	0:19	12	L	0,14
13.06.2001 18:27	2:10	16	L	1,55
14.06.2001 09:31	0:31	14	L	0,30
15.06.2001 10:03	0:20	12	L	0,14
16.06.2001 10:14	0:13	12	L	0,09
16.06.2001 14:59	1:45	14	L	1,01
17.06.2001 10:44	0:16	12	L	0,12
17.06.2001 20:49	0:51	10	L	0,25
18.06.2001 09:07	0:13	12	L	0,09
18.06.2001 18:05	1:33	18	L	1,34
19.06.2001 08:36	0:13	12	L	0,09
19.06.2001 18:23	1:22	14	L	0,78
20.06.2001 08:50	0:12	12	L	0,09
20.06.2001 18:01	0:40	15	L	0,44
21.06.2001 08:58	0:13	14	L	0,12
21.06.2001 19:41	0:37	10	L	0,18
22.06.2001 08:50	0:13	12	L	0,09
23.06.2001 07:56	0:11	12	L	0,08
24.06.2001 07:23	0:12	12	L	0,09
25.06.2001 06:51	0:11	12	L	0,08
26.06.2001 07:23	0:17	12	L	0,12
26.06.2001 21:30	1:07	11	L	0,40
27.06.2001 07:23	0:18	14	L	0,18
27.06.2001 20:57	2:08	15	L	1,37
28.06.2001 07:20	0:18	14	L	0,18
28.06.2001 16:47	0:56	17	L	0,74
29.06.2001 09:09	0:20	14	L	0,19
29.06.2001 21:05	1:17	11	I	0,46
30.06.2001 08:44	0:18	12	L	0,13
30.06.2001 13:27	1:16	17	L	1,00
01.07.2001 09:41	0:17	13	L	0,15
02.07.2001 07:36	0:19	12	L	0,14
03.07.2001 07:17	0:19	12	L	0,14
04.07.2001 07:32	0:18	12	L	0,13

Tab. 7: Belastungsdaten zu Untersuchung 2

Datum und Zeit	Dauer	RPE	Disziplin	TI
27.05.2004 15:00	01:20	11	L	0,48
29.05.2004 12:00	02:00	18	L	1,71
30.05.2004 11:00	01:30	7	L	0,11
31.05.2004 09:00	00:45	12	L	0,32
02.06.2004 19:00	01:10	10	L	0,33
03.06.2004 16:00	00:25	13	L	0,21
05.06.2004 21:00	00:45	15	L	0,48
07.06.2004 17:00	01:00	10	L	0,29
08.06.2004 09:00	01:00	8	L	0,14
08.06.2004 09:00	01:00	8	L	0,14
08.06.2004 09:00	00:30	8	L	0,07
08.06.2004 11:00	00:25	10	L	0,12
09.06.2004 17:00	01:00	15	L	0,64
10.06.2004 16:00	00:45	12	L	0,32
11.06.2004 19:00	01:00	10	A	0,29
12.06.2004 16:00	01:30	6	A	0,00
13.06.2004 12:00	00:30	6	A	0,00
14.06.2004 17:00	01:00	8	L	0,14
14.06.2004 20:00	00:45	14	L	0,43
15.06.2004 09:00	01:00	8	L	0,14
15.06.2004 09:00	01:00	8	L	0,14

15.06.2004 09:00	01:00	8	L	0,14
16.06.2004 16:00	01:25	12	L	0,61
18.06.2004 16:00	00:40	14	L	0,38
19.06.2004 15:00	00:45	6	L	0,00
20.06.2004 09:30	00:15	10	L	0,07
20.06.2004 10:00	00:14	18	L	0,20
21.06.2004 17:00	01:00	8	L	0,14
22.06.2004 19:00	01:25	9	L	0,30
23.06.2004 16:00	00:50	12	L	0,36
24.06.2004 16:00	01:15	13	L	0,63
25.06.2004 16:00	01:00	12	L	0,43
25.06.2004 19:00	01:15	9	A	0,27
28.06.2004 19:00	00:40	16	L	0,48
30.06.2004 15:00	02:00	14	R	1,14
01.07.2004 10:00	01:00	14	L	0,57
01.07.2004 14:00	01:00	15	R	0,64
01.07.2004 15:00	00:45	12	L	0,32
02.07.2004 10:00	01:00	14	L	0,57
05.07.2004 16:00	01:20	13	L	0,67
06.07.2004 16:00	01:20	15	L	0,86
07.07.2004 12:00	00:40	11	L	0,24
08.07.2004 17:00	00:40	15	L	0,43
09.07.2004 16:00	01:20	13	L	0,67
13.07.2004 19:00	00:40	16	L	0,48
14.07.2004 19:00	01:00	11	R	0,36
15.07.2004 15:00	02:00	15	R	1,29
16.07.2004 15:00	01:20	14	R	0,76
16.07.2004 19:00	01:00	10	A	0,29
17.07.2004 17:00	00:45	15	L	0,48
18.07.2004 10:00	01:30	13	R	0,75
19.07.2004 20:00	01:35	11	L	0,57
21.07.2004 08:00	00:50	10	R	0,24
21.07.2004 21:00	01:10	19	L	1,08
22.07.2004 17:00	01:20	14	R	0,76
24.07.2004 15:00	01:00	7	R	0,07
24.07.2004 20:00	01:00	10	L	0,29
25.07.2004 19:15	01:16	9	L	0,27
26.07.2004 13:45	02:33	16	L	1,82
28.07.2004 13:30	00:50	12	L	0,36
29.07.2004 11:00	00:25	12	L	0,18
29.07.2004 15:00	00:25	13	L	0,21
01.08.2004 11:45	01:01	18	Tri	0,87
01.08.2004 15:00	00:30	11	R	0,18
05.08.2004 16:00	01:50	12	R	0,79
05.08.2004 17:50	00:10	8	S	0,02
06.08.2004 19:00	01:05	13	A	0,54
07.08.2004 19:00	00:54	16	R	0,64
08.08.2004 15:30	01:45	13	R	0,88
09.08.2004 20:00	01:00	12	R	0,43
10.08.2004 19:00	00:30	9	L	0,11
11.08.2004 18:30	02:00	16	R	1,43
12.08.2004 17:00	00:20	10	L	0,10
12.08.2004 17:45	00:45	10	I	0,21
13.08.2004 19:00	01:00	12	A	0,43
14.08.2004 15:00	01:00	7	L	0,07
15.08.2004 11:00	00:45	8	L	0,11
15.08.2004 16:00	01:45	14	R	1,00
17.08.2004 14:00	00:25	11	L	0,15

17.08.2004 17:00	00:40	12	R	0,29
17.08.2004 20:30	00:45	12	R	0,32
18.08.2004 11:00	01:00	11	R	0,36
18.08.2004 16:30	01:20	12	R	0,57
18.08.2004 21:00	00:20	11	L	0,12
19.08.2004 13:00	01:20	11	R	0,48
19.08.2004 21:10	00:30	9	L	0,11
21.08.2004 16:00	00:14	18	L	0,20
22.08.2004 13:00	06:30	16	R	4,64
24.08.2004 13:00	00:12	10	L	0,06
25.08.2004 17:00	00:40	6	L	0,00
25.08.2004 21:00	00:40	13	L	0,33
27.08.2004 19:00	00:20	9	L	0,07
28.08.2004 16:00	00:46	11	L	0,27
28.08.2004 17:30	00:30	14	L	0,29
29.08.2004 14:00	02:00	15	R	1,29
30.08.2004 16:30	00:40	13	L	0,33
31.08.2004 19:00	00:30	7	L	0,04
31.08.2004 20:00	00:20	13	R	0,17
01.09.2004 17:00	00:50	7	L	0,06
01.09.2004 21:00	00:50	9	L	0,18
02.09.2004 20:45	00:50	9	L	0,18
03.09.2004 10:00	00:45	9	L	0,16
03.09.2004 19:00	00:50	10	A	0,24
08.09.2004 17:00	00:40	7	L	0,05
09.09.2004 21:00	00:40	12	L	0,29
10.09.2004 11:00	00:40	11	L	0,24
11.09.2004 15:00	01:00	6	L	0,00
12.09.2004 11:00	00:20	11	L	0,12
13.09.2004 20:00	00:40	12	L	0,29
14.09.2004 11:00	01:30	15	L	0,96
15.09.2004 09:30	00:20	9	L	0,07
15.09.2004 12:00	00:20	10	L	0,10
15.09.2004 16:00	00:40	11	L	0,24
16.09.2004 10:00	01:00	6	L	0,00
16.09.2004 13:00	00:55	13	L	0,46
18.09.2004 11:00	02:00	20	L	2,00
18.09.2004 22:00	03:00	11	A	1,07
22.09.2004 17:00	01:00	8	L	0,14
23.09.2004 16:20	00:54	12	L	0,39
24.09.2004 09:00	00:54	8	L	0,13
24.09.2004 19:00	00:30	12	A	0,21
26.09.2004 21:00	00:30	10	R	0,14
27.09.2004 16:00	00:45	11	L	0,27
28.09.2004 21:00	00:30	11	L	0,18
29.09.2004 17:00	01:00	8	L	0,14
30.09.2004 11:00	01:30	10	R	0,43
30.09.2004 17:00	00:47	14	L	0,45
01.10.2004 11:00	00:52	9	L	0,19
01.10.2004 19:00	00:30	9	A	0,11
02.10.2004 15:00	01:12	11	L	0,43
03.10.2004 16:30	01:10	12	L	0,50
04.10.2004 17:00	00:50	13	L	0,42
05.10.2004 09:30	01:05	10	L	0,31
06.10.2004 17:00	01:10	10	L	0,33
07.10.2004 18:00	00:20	10	L	0,10
10.10.2004 13:00	01:20	14	L	0,76
11.10.2004 22:30	00:20	9	L	0,07

12.10.2004 11:00	01:10	12	L	0,50
13.10.2004 17:00	01:10	11	L	0,42
20.10.2004 17:00	01:00	9	L	0,21
25.10.2004 13:30	00:25	11	L	0,15
26.10.2004 11:00	00:48	11	L	0,29
26.10.2004 21:00	00:30	14	I	0,29
30.10.2004 09:00	01:00	7	R	0,07
03.11.2004 11:00	00:15	12	L	0,11
09.11.2004 11:30	01:00	11	L	0,36
10.11.2004 17:00	00:45	6	L	0,00
11.11.2004 11:00	01:00	12	L	0,43
12.11.2004 11:00	00:45	12	L	0,32
16.11.2004 09:00	00:40	7	L	0,05
17.11.2004 09:00	01:10	9	L	0,25
21.11.2004 09:00	01:15	11	L	0,45
22.11.2004 16:30	00:30	11	L	0,18
23.11.2004 11:00	01:00	12	L	0,43
23.11.2004 12:30	00:45	9	R	0,16
24.11.2004 17:00	01:00	8	L	0,14
26.11.2004 16:00	00:45	13	L	0,38
27.11.2004 13:30	00:45	13	L	0,38
28.11.2004 11:15	00:35	16	L	0,42
01.12.2004 11:30	00:30	8	L	0,07
01.12.2004 12:00	00:25	12	L	0,18
01.12.2004 17:00	00:45	8	L	0,11
02.12.2004 16:00	00:45	15	L	0,48
03.12.2004 11:30	00:40	14	L	0,38
03.12.2004 19:00	00:45	10	A	0,21
05.12.2004 15:00	00:20	11	L	0,12
22.12.2004 17:00	01:00	7	L	0,07
24.12.2004 10:00	01:37	16	L	1,15
25.12.2004 10:00	01:33	16	L	1,11
27.12.2004 10:00	00:50	13	L	0,42
01.01.2005 13:00	00:55	12	L	0,39
03.01.2005 10:00	00:35	10	L	0,17
04.01.2005 10:00	00:40	10	L	0,19
05.01.2005 16:00	00:55	12	L	0,39
08.01.2005 09:30	02:00	10	R	0,57
08.01.2005 14:30	00:30	7	A	0,04
08.01.2005 15:15	00:50	16	L	0,60
09.01.2005 10:30	01:00	18	L	0,86
12.01.2005 17:00	01:00	8	L	0,14
13.01.2005 17:00	00:45	6	L	0,00
15.01.2005 22:00	01:10	13	L	0,58
18.01.2005 15:00	00:45	11	R	0,27
20.01.2005 17:00	01:00	8	L	0,14
21.01.2005 11:00	00:50	10	R	0,24
21.01.2005 19:00	01:30	8	A	0,21
22.01.2005 12:00	01:00	9	R	0,21
23.01.2005 15:00	00:55	11	L	0,33
26.01.2005 17:00	01:00	7	L	0,07
28.01.2005 19:00	01:30	10	A	0,43
29.01.2005 10:00	01:30	7	R	0,11
31.01.2005 17:00	01:00	6	L	0,00
01.02.2005 17:00	00:45	7	L	0,05
02.02.2005 12:00	01:00	12	L	0,43
03.02.2005 17:00	01:00	9	L	0,21
04.02.2005 15:00	00:35	14	L	0,33

05.02.2005 15:00	00:45	10	L	0,21
07.02.2005 09:30	00:30	11	L	0,18
08.02.2005 17:00	01:00	8	L	0,14
10.02.2005 17:00	01:10	9	L	0,25
10.02.2005 19:30	00:20	9	L	0,07
12.02.2005 15:30	01:45	12	R	0,75
13.02.2005 11:00	00:30	16	L	0,36
14.02.2005 14:00	00:50	16	L	0,60
15.02.2005 11:00	00:50	11	L	0,30
15.02.2005 17:00	00:50	8	L	0,12
16.02.2005 15:30	01:00	14	R	0,57
17.02.2005 11:00	00:20	10	L	0,10
17.02.2005 17:00	01:00	8	L	0,14
17.02.2005 19:00	00:30	8	L	0,07
18.02.2005 12:00	00:30	10	L	0,14
18.02.2005 19:00	01:15	10	A	0,36
19.02.2005 14:00	01:30	6	A	0,00
23.02.2005 17:00	01:00	7	L	0,07
24.02.2005 17:00	01:00	7	L	0,07
24.02.2005 19:00	00:45	8	L	0,11
25.02.2005 19:00	01:20	12	A	0,57
27.02.2005 10:00	01:00	7	L	0,07
01.03.2005 09:00	01:00	9	L	0,21
01.03.2005 17:00	00:30	10	LL	0,14
02.03.2005 16:00	00:45	10	L	0,21
03.03.2005 00:00	01:00	12	LL	0,43
03.03.2005 17:00	01:15	7	L	0,09
03.03.2005 19:00	00:45	8	L	0,11
04.03.2005 09:00	01:30	14	LL	0,86
04.03.2005 19:00	01:10	12	A	0,50
05.03.2005 15:00	00:30	9	A	0,11
05.03.2005 17:30	00:30	15	LL	0,32
06.03.2005 09:00	01:10	12	LL	0,50
06.03.2005 16:00	00:45	9	I	0,16
07.03.2005 09:00	01:10	7	L	0,08
08.03.2005 17:00	01:10	7	L	0,08
10.03.2005 19:00	00:45	9	L	0,16
12.03.2005 12:30	01:00	12	L	0,43
13.03.2005 13:30	01:00	12	L	0,43
14.03.2005 09:00	01:10	8	L	0,17
15.03.2005 15:00	00:21	17	R	0,28
15.03.2005 17:00	01:10	9	L	0,25
16.03.2005 15:00	01:15	14	L	0,71
17.03.2005 19:00	00:45	8	L	0,11
20.03.2005 07:30	00:25	10	L	0,12
20.03.2005 11:00	03:00	13	R	1,50
21.03.2005 11:00	03:20	14	R	1,90
21.03.2005 19:00	00:30	8	A	0,07
22.03.2005 10:00	04:20	14	R	2,48
23.03.2005 19:00	00:30	8	A	0,07
24.03.2005 07:30	00:30	11	L	0,18
24.03.2005 10:30	03:55	15	R	2,52
24.03.2005 19:00	00:45	8	A	0,11
25.03.2005 06:30	00:35	9	L	0,13
25.03.2005 12:00	00:20	10	L	0,10
25.03.2005 14:00	02:45	13	R	1,38
25.03.2005 20:00	00:50	11	R	0,30
26.03.2005 10:00	05:30	14	R	3,14

27.03.2005 20:00	00:20	10	S	0,10
28.03.2005 11:00	03:00	15	R	1,93
28.03.2005 17:00	00:45	13	L	0,38
28.03.2005 18:00	00:30	6	A	0,00
29.03.2005 12:00	02:30	11	R	0,89
01.04.2005 17:30	01:00	12	R	0,43
02.04.2005 16:15	03:00	16	R	2,14
04.04.2005 09:15	01:10	8	L	0,17
05.04.2005 17:00	01:20	9	L	0,29
06.04.2005 11:00	00:45	12	L	0,32
07.04.2005 19:00	00:45	7	L	0,05
08.04.2005 09:30	00:35	11	L	0,21
08.04.2005 19:00	00:40	9	A	0,14
09.04.2005 07:20	07:30	9	R	1,61
10.04.2005 15:45	01:10	16	R	0,83
11.04.2005 09:15	01:00	7	L	0,07
11.04.2005 16:30	00:30	15	L	0,32
12.04.2005 17:00	01:00	7	L	0,07
12.04.2005 19:30	00:30	8	L	0,07
13.04.2005 17:00	01:00	8	L	0,14
13.04.2005 19:00	00:20	8	L	0,05
14.04.2005 19:00	00:50	10	L	0,24
18.04.2005 09:00	01:15	9	L	0,27
19.04.2005 17:00	01:00	8	L	0,14
19.04.2005 19:00	00:30	9	L	0,11
20.04.2005 18:00	01:20	10	L	0,38
21.04.2005 19:00	00:45	7	L	0,05
22.04.2005 14:00	03:00	16	R	2,14
24.04.2005 17:30	00:30	13	L	0,25
26.04.2005 17:00	01:00	9	L	0,21
26.04.2005 19:00	00:30	10	L	0,14
27.04.2005 18:00	01:30	11	L	0,54
28.04.2005 18:00	00:20	8	L	0,05
28.04.2005 19:15	01:00	7	L	0,07
29.04.2005 18:00	01:00	7	L	0,07
04.05.2005 14:00	00:55	12	L	0,39
07.05.2005 16:00	01:30	8	L	0,21
08.05.2005 16:00	00:30	13	L	0,25
10.05.2005 17:00	01:10	8	L	0,17
10.05.2005 19:00	00:25	10	L	0,12
11.05.2005 18:00	01:20	9	L	0,29
12.05.2005 12:00	00:50	8	R	0,12
12.05.2005 18:00	00:30	9	L	0,11
12.05.2005 19:30	01:00	8	L	0,14
13.05.2005 17:00	00:50	8	R	0,12
16.05.2005 16:00	01:05	12	L	0,46
17.05.2005 17:00	01:00	9	L	0,21
17.05.2005 19:00	00:30	9	L	0,11
19.05.2005 17:30	00:30	8	L	0,07
19.05.2005 19:15	01:00	7	L	0,07
22.05.2005 07:00	00:20	7	L	0,02
23.05.2005 17:30	01:00	7	L	0,07
24.05.2005 17:00	01:00	8	L	0,14
24.05.2005 19:00	00:40	9	L	0,14
25.05.2005 12:00	00:35	12	L	0,25
25.05.2005 13:00	00:40	12	R	0,29
25.05.2005 18:30	00:45	7	L	0,05
26.05.2005 17:30	00:30	9	L	0,11

26.05.2005 19:15	01:15	9	L	0,27
27.05.2005 20:30	00:45	8	R	0,11
28.05.2005 11:00	00:25	10	L	0,12
30.05.2005 17:30	01:00	7	L	0,07
31.05.2005 17:00	01:00	9	L	0,21
31.05.2005 19:00	00:30	9	L	0,11
01.06.2005 18:00	01:15	10	L	0,36
01.06.2005 19:00	01:00	10	L	0,29
02.06.2005 17:30	00:30	10	L	0,14
02.06.2005 19:00	01:00	8	L	0,14
03.06.2005 19:00	01:00	9	A	0,21
07.06.2005 11:30	00:25	11	L	0,15
07.06.2005 19:00	00:35	8	L	0,08
08.06.2005 18:00	01:10	8	L	0,17
09.06.2005 17:30	00:30	7	L	0,04
09.06.2005 19:30	01:00	8	L	0,14
10.06.2005 19:00	01:15	8	A	0,18
12.06.2005 11:30	00:20	19	L	0,31
12.06.2005 13:30	00:20	17	L	0,26
13.06.2005 17:30	01:00	7	L	0,07
15.06.2005 18:00	01:10	9	L	0,25
16.06.2005 17:30	00:30	8	L	0,07
16.06.2005 19:15	01:15	10	L	0,36
19.06.2005 12:00	00:30	17	L	0,39
20.06.2005 17:30	00:50	8	L	0,12
21.06.2005 16:00	01:10	12	L	0,50
22.06.2005 12:30	00:30	11	L	0,18
23.06.2005 17:30	00:30	9	L	0,11
24.06.2005 19:00	00:30	11	L	0,18
25.06.2005 15:00	00:25	10	L	0,12
25.06.2005 16:00	00:16	19	L	0,25
27.06.2005 17:30	01:00	9	L	0,21
28.06.2005 21:00	01:00	15	L	0,64
30.06.2005 17:00	00:20	8	L	0,05
01.07.2005 17:00	00:30	13	I	0,25
02.07.2005 17:00	00:25	9	L	0,09
02.07.2005 19:00	01:00	6	L	0,00
03.07.2005 07:00	00:40	12	L	0,29
03.07.2005 09:00	01:00	6	L	0,00
06.07.2005 22:00	00:40	14	L	0,38
07.07.2005 17:30	00:30	9	L	0,11
07.07.2005 18:30	00:30	11	L	0,18
07.07.2005 21:00	01:00	6	L	0,00
08.07.2005 16:45	02:00	14	R	1,14
08.07.2005 19:00	00:20	6	L	0,00
10.07.2005 09:00	01:40	15	R	1,07
11.07.2005 17:30	01:00	10	L	0,29
12.07.2005 11:00	01:00	11	R	0,36
14.07.2005 10:00	00:20	8	L	0,05
14.07.2005 17:00	01:00	12	L	0,43
15.07.2005 15:30	02:00	14	R	1,14
17.07.2005 16:00	00:50	12	L	0,36
19.07.2005 15:00	00:50	11	L	0,30
25.07.2005 16:30	01:15	11	L	0,45
26.07.2005 09:00	01:00	10	R	0,29
26.07.2005 16:30	00:45	13	L	0,38
27.07.2005 09:30	01:30	14	R	0,86
28.07.2005 09:00	02:00	12	R	0,86

29.07.2005 09:30	01:30	18	R	1,29
29.07.2005 11:00	00:30	17	L	0,39
30.07.2005 10:00	01:00	14	L	0,57
30.07.2005 16:00	01:30	10	R	0,43
01.08.2005 20:00	00:45	12	L	0,32
02.08.2005 10:00	03:00	8	L	0,43
02.08.2005 17:00	00:50	14	L	0,48
03.08.2005 10:00	01:00	6	L	0,00
04.08.2005 11:00	03:00	8	L	0,43
04.08.2005 17:00	00:45	12	L	0,32
05.08.2005 16:00	00:40	10	L	0,19
06.08.2005 10:00	00:42	16	L	0,50
06.08.2005 15:00	01:00	8	L	0,14
07.08.2005 10:00	01:45	14	L	1,00
09.08.2005 17:30	01:00	10	L	0,29
11.08.2005 15:00	01:15	12	R	0,54
11.08.2005 17:00	00:35	10	L	0,17
11.08.2005 18:00	01:00	16	R	0,71
12.08.2005 10:00	00:30	10	L	0,14
13.08.2005 11:00	01:10	14	L	0,67
14.08.2005 18:00	00:30	10	L	0,14
15.08.2005 09:30	01:45	14	R	1,00
16.08.2005 18:00	01:15	11	L	0,45
17.08.2005 19:00	01:05	16	R	0,77
18.08.2005 17:00	00:35	10	L	0,17
18.08.2005 18:00	00:35	14	L	0,33
19.08.2005 18:30	00:30	8	R	0,07
19.08.2005 19:00	01:00	10	A	0,29
20.08.2005 11:00	01:35	16	L	1,13
21.08.2005 11:00	01:15	12	R	0,54
22.08.2005 19:00	00:55	14	L	0,52
23.08.2005 19:00	00:55	13	L	0,46
24.08.2005 19:00	01:15	14	R	0,71
25.08.2005 17:00	00:25	12	L	0,18
26.08.2005 19:00	01:00	10	A	0,29
27.08.2005 14:00	01:06	16	Tri	0,79
28.08.2005 00:00	01:00	12	R	0,43
29.08.2005 16:00	00:50	15	L	0,54
30.08.2005 17:30	01:00	10	L	0,29
31.08.2005 19:00	00:50	16	R	0,60
01.09.2005 15:00	01:05	10	R	0,31
01.09.2005 17:30	00:50	10	L	0,24
01.09.2005 19:00	01:05	14	R	0,62
03.09.2005 17:30	00:40	14	I	0,38
04.09.2005 11:45	00:59	18	Tri	0,85
05.09.2005 20:00	01:00	13	L	0,50
06.09.2005 14:00	01:05	13	L	0,54
07.09.2005 20:00	01:10	14	L	0,67
08.09.2005 09:30	01:30	14	R	0,86

08.09.2005 17:00	01:00	11	L	0,36
09.09.2005 15:00	01:00	8	A	0,14
09.09.2005 19:00	01:00	10	A	0,29
10.09.2005 16:30	01:25	11	L	0,51
11.09.2005 16:30	01:35	13	L	0,79
13.09.2005 13:00	01:10	16	R	0,83
13.09.2005 18:00	01:25	13	R	0,71
15.09.2005 09:00	00:20	11	L	0,12
16.09.2005 11:00	01:00	11	R	0,36
16.09.2005 19:00	01:00	10	A	0,29
18.09.2005 17:00	01:00	12	L	0,43
19.09.2005 12:30	00:30	11	L	0,18
20.09.2005 17:00	01:00	10	L	0,29
22.09.2005 11:00	00:20	8	L	0,05
24.09.2005 11:00	02:00	17	L	1,57
25.09.2005 13:30	01:30	8	L	0,21
26.09.2005 10:00	01:00	6	R	0,00
26.09.2005 13:00	01:30	8	L	0,21
26.09.2005 17:00	02:30	6	L	0,00
27.09.2005 10:00	01:00	6	L	0,00
29.09.2005 16:30	00:20	10	L	0,10
30.09.2005 19:00	01:00	10	A	0,29
02.10.2005 16:30	00:50	10	R	0,24
05.10.2005 17:00	01:40	9	L	0,36
07.10.2005 18:00	00:50	8	I	0,12
09.10.2005 11:00	00:40	13	L	0,33
11.10.2005 12:00	00:20	12	L	0,14
12.10.2005 16:30	01:00	13	L	0,50
13.10.2005 17:00	01:10	11	L	0,42
14.10.2005 19:00	00:50	10	L	0,24
18.10.2005 17:30	00:45	12	L	0,32
20.10.2005 17:00	00:30	9	L	0,11
21.10.2005 17:15	00:45	11	L	0,27
24.10.2005 09:00	00:45	8	L	0,11
25.10.2005 10:30	00:50	13	L	0,42
26.10.2005 16:00	00:35	12	L	0,25
27.10.2005 17:00	00:35	10	L	0,17
27.10.2005 19:30	00:30	10	L	0,14
28.10.2005 19:00	00:50	8	A	0,12
29.10.2005 17:00	00:55	12	L	0,39
30.10.2005 16:30	00:55	12	L	0,39
31.10.2005 09:00	01:00	9	L	0,21
31.10.2005 13:00	00:40	10	R	0,19
01.11.2005 16:00	01:00	11	L	0,36
02.11.2005 16:00	00:30	14	L	0,29
03.11.2005 19:30	01:30	10	L	0,43
07.11.2005 08:00	01:00	9	L	0,21

Tab. 8: Leistungsdaten zu Untersuchung 3

Vp	Laktattest V _{La3} [km/h]	Zeitfahren		HF _{AST} [Schläge/min]					
		Zeit [min:sec]	V _{TT} [km/h]	20.03.	23.03.	24.03.	27.03.	29.03.	30.03.
1	13,0	08:07	27,0	145,5	162,9	-	159,2	160,7	172,9
2	12,9	07:00	31,3	161,6	152,3	158,2	154,4	154,4	146,8
3	15,1	07:04	31,0	174,2	166,2	164,5	150,7	153,1	152,3
4	13,6	06:56	31,6	169,6	160,0	159,1	150,1	155,4	151,1
5	14,1	06:34	33,4	147,6	141,6	149,8	146,5	135,8	138,2
6	14,9	06:27	34,0	160,1	162,2	147,2	145,1	143,9	-
7	14,5	06:10	35,5	151,8	150,2	149,9	150,3	146,6	145,6

Fragestellung 1**Tab. 9:** Modellparameter für $\Delta t = 24$ h (Fragestellung 1)

	VA	BF	AF	APRmax	AR	DF
Untersuchung 1	1,20	-2	-3,8	0,737	-2,1	0,6
Untersuchung 2	1,00	-1	-2,4	2,000	-0,3	0,3
Untersuchung 3, Vp 1	1,45	-3	-4,8	0,395	-3,0	0,5
Untersuchung 3, Vp 2	1,15	-1	-4,8	1,681	-3,0	0,5
Untersuchung 3, Vp 3	1,00	-2	-3,4	1,729	-3,0	0,5
Untersuchung 3, Vp 4	1,00	-1	-4,8	2,162	-3,0	0,5
Untersuchung 3, Vp 5	1,30	-2	-4,2	1,020	-3,0	0,5
Untersuchung 3, Vp 6	1,10	-5	-2,2	1,829	-3,0	0,5
Untersuchung 3, Vp 7	1,00	-1	-3,2	3,200	-3,0	0,5

Tab. 10: Modellparameter für $\Delta t = 8$ h (Fragestellung 1)

	VA	BF	AF	APRmax	AR	DF
Untersuchung 1	2,54	-4	-4,4	0,131	-1,0	0,3
Untersuchung 2	1,10	-1	-2,4	1,818	-0,1	0,3
Untersuchung 3, Vp 1	3,26	-4	-3,4	0,172	-1,0	0,5
Untersuchung 3, Vp 2	1,10	-5	-1,8	1,115	-1,0	0,5
Untersuchung 3, Vp 3	1,10	-1	-4,4	1,859	-1,0	0,5
Untersuchung 3, Vp 4	1,10	-4	-1,8	1,859	-1,0	0,5
Untersuchung 3, Vp 5	3,26	-1	-4,4	0,556	-1,0	0,5
Untersuchung 3, Vp 6	1,58	-9	-1,4	2,100	-1,0	0,5
Untersuchung 3, Vp 7	2,54	-1	-3,2	0,902	-1,0	0,5

Tab. 11: Modellparameter für $\tau = 4$ h (Fragestellung 1)

	VA	BF	AF	APRmax	AR	DF
Untersuchung 1	6,0	-4	-2,6	0,122	-0,40	0,6
Untersuchung 2	1,5	-1	-2,4	1,333	-0,05	0,3
Untersuchung 3, Vp 1	6,5	-7	-3,0	0,092	-0,50	0,5
Untersuchung 3, Vp 2	1,5	-6	-1,8	0,547	-0,50	0,5
Untersuchung 3, Vp 3	2,0	-1	-4,4	1,055	-0,50	0,5
Untersuchung 3, Vp 4	2,0	-8	-1,4	1,055	-0,50	0,5
Untersuchung 3, Vp 5	1,5	-3	-3,2	0,273	-0,50	0,5
Untersuchung 3, Vp 6	4,0	-8	-4,8	0,091	-0,50	0,5
Untersuchung 3, Vp 7	4,0	-3	-1,8	0,469	-0,50	0,5

Tab. 12: Güte der Modellanpassung (Fragestellung 1)

	Güte der Modellanpassung (r_{ICC})		
	$\tau = 24$ h	$\tau = 8$ h	$\tau = 4$ h
Untersuchung 1	0,83	0,86	0,85
Untersuchung 2	0,63	0,65	0,66
Untersuchung 3, Vp 1	0,59	0,62	0,70
Untersuchung 3, Vp 2	0,56	0,90	0,85
Untersuchung 3, Vp 3	0,83	0,92	0,93
Untersuchung 3, Vp 4	0,69	0,86	0,83
Untersuchung 3, Vp 5	0,63	0,66	0,73
Untersuchung 3, Vp 6	0,96	0,95	0,94
Untersuchung 3, Vp 7	0,86	0,93	0,95
<i>M</i>	0,73	0,82	0,83
<i>SD</i>	0,14	0,13	0,10

Fragestellung 2

Tab. 13: Zufallsgeneriertes Belastungsprofil (Fragestellung 2)

Tag	Belastung				
1	1,28	10	1,16	20	0,23
2	0,78	11	1,84	21	0,92
3	0,43	12	0,61	22	0,35
4	1,77	13	0,07	23	1,87
5	0,66	14	1,91	24	0,91
6	1,92	15	0,46	25	0,93
7	1,78	16	0,23	26	0,22
8	1,34	17	1,64	27	0,13
9	0,63	18	1,25	28	0,35
		19	0,17		

Tab. 14: Parameter der Modelle U1, F, F_{80%} und F_{120%} (Fragestellung 2)

	VA	BF	AF	APRmax	AR	DF
Modell U1	2,54	-4	-4,4	0,131	-1,0	0,3
Modell F	2,78	-4	-4	0,133	-0,9	0,3
Modell F_{80%}	2,78	-4	-3,6	0,142	-0,8	0,3
Modell F_{120%}	2,54	-5	-2,8	0,169	-0,7	0,3

Tab. 15: Simulierte HF_{AST}-Werte (Fragestellung 2)

	Fiktives Belastungsprofil						Zufallsprofil		
	80% der Belastung		100% der Belastung		120% der Belastung				
Modell Tag	U1	F _{80%}	U1	F	U1	F _{120%}	F _{80%}	F	F _{120%}
1	158,4	158,4	158,4	158,4	158,4	158,4	158,4	158,4	158,4
2	161,3	160,9	161,8	161,7	162,4	162,2	163,9	164,1	164,5
3	160,8	160,8	161,6	161,7	162,4	162,6	163,2	163,5	163,4
4	158,4	158,5	158,6	158,7	159,1	158,7	161,2	161,6	160,8
5	159,9	159,6	160,2	160,0	160,9	160,6	165,1	165,4	165,8
6	159,3	159,2	159,6	159,5	160,5	160,3	164,0	164,3	164,1
7	158,3	158,5	158,8	158,9	160,0	160,1	168,0	168,4	168,9
8	156,1	156,2	155,9	156,0	156,7	156,4	171,4	171,8	172,9
9	158,2	158,0	158,3	158,1	159,5	159,4	173,0	173,5	174,6
10	157,8	157,7	158,2	158,2	159,9	160,1	171,8	172,3	172,8
11	155,0	155,0	154,9	154,9	156,3	156,0	172,8	173,3	173,8
12	156,5	156,2	156,6	156,4	158,2	158,1	176,4	177,0	178,1
13	155,8	155,7	156,1	156,0	157,9	158,1	175,1	175,7	176,1
14	155,0	155,1	155,5	155,6	157,9	158,2	171,7	172,3	172,3
15	152,4	152,5	152,3	152,4	154,4	154,1	177,7	178,3	179,9
16	154,6	154,4	155,0	154,8	157,4	157,5	175,8	176,4	177,2
17	154,3	154,3	155,0	155,1	158,3	158,6	173,0	173,7	173,9
18	151,2	151,3	151,6	151,6	154,5	154,3	177,2	177,8	179,6
19	152,8	152,6	153,4	153,2	156,5	156,7	178,5	179,2	180,8
20	152,2	152,1	153,0	153,0	156,5	157,0	175,5	176,2	176,7
21	151,5	151,6	152,7	152,9	156,9	157,5	173,4	174,1	175,2
22	148,5	148,7	149,4	149,6	153,3	153,2	175,3	175,9	177,6
23	149,9	149,8	151,0	150,9	155,1	155,2	173,0	173,6	174,7
24	149,3	149,3	150,6	150,6	154,9	155,4	177,5	178,1	180,8
25	147,0	147,1	147,6	147,6	151,6	151,6	177,4	178,1	180,4
26	148,4	148,1	149,2	148,9	153,3	153,3	177,4	178,2	180,0
27	147,9	147,8	148,5	148,4	152,9	153,0	174,6	175,4	176,2
28	146,9	147,0	147,7	147,7	152,2	152,6	173,0	173,6	174,9

Fragestellung 3**Tab. 16:** Parameter der Modelle U_{1ungerade}, U_{1gerade}, U_{2ungerade} und U_{2gerade} (Fragestellung 3)

	VA	BF	AF	APRmax	AR	DF
Modell U_{1ungerade}	2,54	-4	-4,4	0,131	-1,0	0,3
Modell U_{1gerade}	1,82	-4	-1,8	0,709	-0,5	0,6
Modell U_{2ungerade}	1,10	-1	-1,2	2,534	-0,1	0,6
Modell U_{2gerade}	1,10	-1	-2,4	1,818	-0,1	0,3

Tab. 17: Simulierte HF_{AST}-Werte (Fragestellung 3)

Modell	Untersuchung 1		Untersuchung 2	
	U1 _{ungerade}	U1 _{gerade}	U2 _{ungerade}	U2 _{gerade}
1	160,6	159,9	154,7	155,3
2	163,0	163,4	151,5	154,3
3	160,6	160,1	151,3	154,2
4	158,1	158,6	153,1	155,8
5	158,0	159,1	151,3	153,1
6	163,3	165,2	151,8	153,5
7	159,9	157,5	150,6	151,8
8	159,5	155,5	153,4	154,2
9	156,8	155,4	159,0	159,1
10	157,8	156,3	158,7	158,6
11	155,4	155,5	161,9	161,7
12	156,3	155,5	162,8	162,6
13	152,7	154,3	167,2	165,9
14	153,8	155,6	167,4	166,0
15	155,5	156,5	168,5	166,3
16	152,7	155,6	157,9	161,7
17	154,3	154,6	161,6	164,5
18	153,3	152,9	162,8	165,5
19	151,4	152,2	164,1	166,5
20	150,1	153,7	163,9	166,0
21	153,5	154,4	152,7	155,7
22	150,8	150,6	153,1	155,6
23	148,3	151,0	155,4	157,8
24	150,2	150,4	157,3	158,7
25	147,8	150,2		
26	150,3	151,0		
27	149,9	148,2		
28	148,1	146,8		
29	145,4	146,4		
30	144,3	146,7		
31	144,6	147,6		
32	146,1	148,8		
33	147,9	150,0		
34	151,0	152,8		
35	153,7	156,7		
36	152,2	148,9		
37	149,6	147,4		
38	150,4	145,6		
39	148,3	145,2		
40	146,7	145,7		
41	147,2	146,7		

Fragestellung 4**Tab. 18:** Parameter der Modelle U1 und U2 (Fragestellung 4)

	VA	BF	AF	APRmax	AR	DF
Modell U1	2,54	-4	-4,4	0,131	-1,0	0,3
Modell U2	1,10	-1	-2,4	1,818	-0,1	0,3

Tab. 19: Simulierte HF_{AST}-Werte (Fragestellung 4)

	Untersuchung 1			Untersuchung 2		
	Datum	Messwerte	Modell U1	Datum	Messwerte	Modell U2
1	24.05.01	158,4		21.07.04	158,1	
2	25.05.01	156,5	160,6	12.08.04	153,0	155,3
3	26.05.01	160,7	163,0	24.08.04	154,3	154,3
4	27.05.01	159,7	160,6	30.08.04	153,6	154,2
5	28.05.01	159,9	158,1	12.09.04	156,7	155,8
6	29.05.01	157,4	158,0	23.09.04	157,9	153,1
7	30.05.01	165,1	163,3	27.09.04	154,6	153,5
8	31.05.01	154,9	159,9	07.10.04	155,9	151,8
9	01.06.01	156,5	159,5	25.10.04	158,3	154,2
10	02.06.01	152,6	156,8	01.12.04	162,4	159,1
11	03.06.01	155,7	157,8	05.12.04	156,0	158,6
12	04.06.01	155,9	155,4	16.12.04	161,2	161,7
13	05.06.01	153,8	156,3	19.12.04	159,1	162,6
14	06.06.01	148,4	152,7	04.02.05	160,0	165,9
15	07.06.01	151,3	153,8	07.02.05	164,0	166,0
16	08.06.01	158,1	155,5	16.03.05	162,0	166,3
17	09.06.01	154,2	152,7	24.04.05	163,0	161,7
18	10.06.01	151,2	154,3	28.05.05	166,7	164,5
19	11.06.01	155,4	153,3	07.06.05	158,1	165,5
20	12.06.01	156,1	151,4	19.06.05	161,8	166,5
21	13.06.01	150,6	150,1	22.06.05	157,0	166,0
22	14.06.01	155,9	153,5	15.09.05	153,3	155,7
23	15.06.01	153,0	150,8	29.09.05	153,7	155,6
24	16.06.01	152,7	148,3	11.10.05	159,4	157,8
25	17.06.01	148,0	150,2	08.11.05	161,0	158,7
26	18.06.01	150,7	147,8			
27	19.06.01	149,5	150,3			
28	20.06.01	147,6	149,9			
29	21.06.01	151,0	148,1			
30	22.06.01	149,9	145,4			
31	23.06.01	145,0	144,3			
32	24.06.01	142,0	144,6			
33	25.06.01	142,5	146,1			
34	26.06.01	149,3	147,9			
35	27.06.01	152,8	151,0			
36	28.06.01	156,5	153,7			
37	29.06.01	154,1	152,2			
38	30.06.01	149,8	149,6			
39	01.07.01	150,6	150,4			
40	02.07.01	149,5	148,3			
41	03.07.01	146,6	146,7			
42	04.07.01	149,1	147,2			

Fragestellung 5

Hypothese 5.1

Tab. 20: Pearson-Korrelationen und Fishers Z-Werte für einwöchige Leistungsprognose (Leistungsmessung täglich) (Fragestellung 5, Hypothese 5.1)

Kalibrierungszeitspanne in Wochen	Prognose-woche	r	Fishers Z
1	2	0,05	0,053
	3	0,39	0,413
	4	-0,49	-0,532
	5	0,31	0,319
	6	0,83	1,195
2	3	0,30	0,311
	4	-0,17	-0,170
	5	0,56	0,637
	6	0,94	1,713
3	4	0,70	0,858
	5	0,76	1,001
	6	0,95	1,792
4	5	0,74	0,950
	6	0,98	2,298
5	6	0,90	1,447

Tab. 21: Pearson-Korrelationen und Fishers Z-Werte für einwöchige Leistungsprognose (Leistungsmessung alle zwei Tage) (Fragestellung 5, Hypothese 5.1)

Kalibrierungszeitspanne in Wochen	Prognose-woche	Kalibrierung an jedem 1., 3., 5., ... Wert		Kalibrierung an jedem 2., 4., 6., ... Wert	
		r	Fishers Z	r	Fishers Z
3	4	0,83	1,188	0,81	1,113
	5	0,22	0,223	0,60	0,695
	6	0,93	1,689	0,94	1,774
4	5	0,85	1,253	0,45	0,480
	6	0,96	1,946	0,82	1,166
5	6	0,96	1,933	0,86	1,297

Tab. 22: Pearson-Korrelationen und Fishers Z-Werte für einwöchige Leistungsprognose (Leistungsmessung alle drei Tage) (Fragestellung 5, Hypothese 5.1)

Kalibrierungszeitspanne in Wochen	Prognose-woche	Kalibrierung an jedem ...					
		1., 4., 7., ... Wert		2., 5., 8., ... Wert		3., 6., 9., ... Wert	
		r	Fishers Z	r	Fishers Z	r	Fishers Z
3	4	0,82	1,142	0,79	1,074	0,47	0,504
	5	0,44	0,473	0,60	0,695	0,67	0,802
	6	0,95	1,822	0,94	1,774	0,91	1,516
4	5	0,32	0,328	0,75	0,966	0,60	0,698
	6	0,83	1,185	0,94	1,721	0,92	1,583
5	6	0,87	1,341	0,91	1,516	0,79	1,058

Hypothese 5.2

Tab. 23: Modellparameter (Fragestellung 5, Hypothese 5.2)

	VA	BF	AF	APRmax	AR	DF
Untersuchung 1	2,54	-4	-4,4	0,131	-1,0	0,3
Untersuchung 2 – ursprüngliche Kalibrierungsphase	1,10	-8	-1,2	1,478	-0,1	0,5
Untersuchung 2 – erweiterte Kalibrierungsphase	3,26	-1	-2,6	0,179	-0,1	0,6

Tab. 24: Simulierte HF_{AST}-Werte (Fragestellung 5, Hypothese 5.2)

	Untersuchung 1		Untersuchung 2		
	Messwerte	simulierte Werte	Messwerte	simulierte Werte (ursprüngl. Kal.)	simulierte Werte (erweiterte Kal.)
1	158,4		158,1		
2	156,5	158,7	153,0	154,0	156,4
3	160,7	162,1	154,3	155,9	155,4
4	159,7	159,7	153,6	155,1	154,6
5	159,9	157,9	156,7	156,4	155,1
6	157,4	158,1	157,9	156,0	154,6
7	165,1	167,3	154,6	156,3	154,7
8	154,9	157,1	155,9	153,8	152,9
9	156,5	155,9	158,3	155,8	154,5
10	152,6	154,7	162,4	159,6	158,3
11	155,7	156,2	156,0	158,8	157,8
12	155,9	154,8	161,2	162,0	160,7
13	153,8	155,8	159,1	162,9	161,6
14	148,4	152,7	160,0	164,3	166,1
15	151,3	153,0	164,0	164,2	165,7
16	158,1	154,4	162,0	162,5	165,1
17	154,2	152,5	163,0	147,9	162,5
18	151,2	153,5	166,7	149,6	164,1
19	155,4	152,2	158,1	150,2	164,5
20	156,1	150,8	161,8	150,8	165,2
21	150,6	151,5	157,0	150,5	165,4
22	155,9	153,6	153,3	129,4	151,3
23	153,0	148,5	153,7	128,5	151,3
24	152,7	147,8	159,4	130,5	153,3
25	148,0	148,2	161,0	130,2	153,1
26	150,7	147,3			
27	149,5	149,7			
28	147,6	147,0			
29	151,0	145,1			
30	149,9	143,9			
31	145,0	143,5			
32	142,0	143,3			
33	142,5	143,4			
34	149,3	143,6			
35	152,8	146,6			
36	156,5	153,3			
37	154,1	143,7			
38	149,8	141,4			
39	150,6	140,8			
40	149,5	139,7			
41	146,6	139,2			
42	149,1	139,2			

Anm.: Kalibrierungsphase ist durch Fettdruck hervorgehoben.

Hypothese 5.3

Tab. 25: Simulierte HF_{AST} -Werte (Fragestellung 5, Hypothese 5.3)

	Mess- werte	simul. Werte						
1	158,4		13	153,8	152,9	28	147,6	144,3
2	156,5	158,5	14	148,4	152,9	29	151,0	143,8
3	160,7	158,9	15	151,3	153,1	30	149,9	143,6
4	159,7	157,8	16	158,1	152,5	31	145,0	143,7
5	159,9	157,7	17	154,2	152,3	32	142,0	143,9
6	157,4	157,7	18	151,2	151,1	33	142,5	144,0
7	165,1	159,1	19	155,4	150,5	34	149,3	144,2
8	154,9	155,7	20	156,1	150,3	35	152,8	144,7
9	156,5	154,7	21	150,6	150,6	36	156,5	145,2
10	152,6	154,8	22	155,9	148,6	37	154,1	141,2
11	155,7	154,1	23	153,0	148,1	38	149,8	140,9
12	155,9	153,8	24	152,7	148,2	39	150,6	139,6
			25	148,0	147,0	40	149,5	139,6
			26	150,7	146,8	41	146,6	139,7
			27	149,5	145,4	42	149,1	139,8

Fragestellung 6

Tab. 26: Modellparameter zu Untersuchung 3 (Fragestellung 6)

Vp	VA	BF	AF	BF*AF+BF	APRmax
1	3,26	-4	-3,4	9,6	0,172
2	1,10	-5	-1,8	4,0	1,115
3	1,10	-1	-4,4	3,4	1,859
4	1,10	-4	-1,8	3,2	1,859
5	3,26	-1	-4,4	3,4	0,556
6	1,58	-9	-1,4	3,6	2,100
7	2,54	-1	-3,2	2,2	0,902

ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Zitate und Quellen sind als solche gekennzeichnet. Ferner versichere ich, dass die vorliegende Arbeit noch nicht zum Zwecke der Erlangung des Doktorgrades an anderer Stelle vorgelegen hat.

Kiel, 20.09.2006

LEBENS LAUF

Jan-Peter Brückner

- geb. am 16.04.1975 in Hamburg
- 1994 Abitur an der Lauenburgischen Gelehrtenschule in Ratzeburg
- 1996-2002 Studium der Sportwissenschaften, Psychologie und Ökotrophologie an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel mit dem Abschluss Magister Artium (M.A.)
- 1998 Ausbildung zum Trainer B – Triathlon der Deutschen Triathlon Union e.V. (DTU)
- 2005/2006 Weiterbildung „Sportpsychologie im Leistungssport“, getragen von der Arbeitsgemeinschaft Sportpsychologie e.V. (asp) und dem Berufsverband Deutscher Psychologen e.V. (BDP)
- 2003 Angestellter im sportmedizinischen Untersuchungszentrum der FördeMED GmbH in Eckernförde
- seit 2004 freiberufliche Tätigkeiten in den Bereich Gesundheitsförderung, Trainingsberatung und Trainerausbildung
- 1996-2000 und seit 2004 Landestrainer der Schleswig-Holsteinischen Triathlon Union e.V. (SHTU)
- seit 2005 Lehrbeauftragter am Institut für Sport und Sportwissenschaften der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel