

# Weiterentwicklung der simulativen Trainingswirkungsanalyse im Spitzensport am Beispiel Radsport

(AZ 070701/11-12)

Mark Pfeiffer (Projektleiter) & Christian Schrot

Universität Mainz, Institut für Sportwissenschaft

## 1 Problemhinführung

Die simulative Trainingswirkungsanalyse als wissenschaftliches Verfahren der Ursache-Wirkungs-Erklärung kann in der Trainingspraxis unterstützend bei der Optimierung des Trainingsprozesses eingesetzt werden. Insbesondere auf dem Gebiet der Leistungsveränderung durch physiologische Adaptation ist mit den antagonistischen Modellen (s. u.) ein großer Fortschritt erzielt worden. Allerdings haben sich diese Modelle – nicht zuletzt aufgrund methodischer und inhaltlicher Mängel (vgl. Taha & Thomas, 2003; Hellard et al., 2006) – im sportpraktischen Handlungsfeld nicht als Routineverfahren etablieren können. Im Rahmen zweier vom Bundesinstitut für Sportwissenschaft (BISp) geförderten Betreuungsprojekte (AZ: IIA1-071608/08 und IIA1-071618/10-11) wurde das von Perl (Mester & Perl, 2000; Perl, 2001) entwickelte antagonistische Performance-Potential-Modell (PerPot) eingesetzt. Neben den in der Literatur genannten Kritikpunkten – insbesondere der modellseitigen Reduzierung des Trainings auf nur eine einzige Eingabegröße – wurden die grundsätzlich positiven Erfahrungen in den beiden genannten Betreuungsprojekten zum Anlass genommen, das Projekt „Weiterentwicklung der simulativen Trainingswirkungsanalyse im Spitzensport am Beispiel Radsport“ durchzuführen.

### 1.1 Antagonistische Modelle zur simulativen Trainingswirkungsanalyse

Ausgehend von einer *systemdynamischen* Betrachtung des sportlichen Trainings und damit der Auffassung des Trainierenden als System, wurden zur Lösung der skizzierten Probleme auf dem Gebiet der Trainingswirkungsanalyse **antagonistische Modelle** zur Untersuchung von Adaptationsprozessen, d. h. der Input-Output-Relationen entwickelt. Die bisher am besten erforschten Modelle sind das bereits Mitte der 1970er-Jahre von der Arbeitsgruppe um Banister entwickelte mathematische **Fitness-Fatigue-Modell** (FF-Modell) (Banister, Calvert, Savage, & Bach, 1975) und das informatische Performance-Potential-Modell (PerPot) von Perl (Perl, 2002). Der entscheidende Entwicklungsfortschritt gegenüber dem FF-Modell besteht in der Implementierung einer *Überlauffunktion* zur Abbildung des Übertrainingsphänomens und der nicht-linearen, dynamischen Modellierung der Eigenschaften des Systems.

Mit der Entwicklung dieser Modelle wurde ein Paradigmenwechsel von linearen zu *nichtlinearen Modellen* vollzogen. Die antagonistische Grundstruktur beider Modelle bewirkt, dass Trainingsbelastungen (Input) die Leistung bzw. Leistungsfähigkeit (Output) *fördernde* als auch *mindernde* Prozesse hervorbringen. Von zentraler Bedeutung für die Modellierung ist dann das Ausmaß der *zeitlichen Verzögerung* der beiden gegenläufig wirkenden Prozesse (Komponenten).

Zusammenfassend ist zu konstatieren, dass auf dem Gebiet der Trainingswirkungsanalyse, d. h. der Analyse von Input-Output-Relationen zumindest für die **Leistungsveränderung durch Adaptation** aktuell mit den antagonistischen Modellen zwar brauchbare Konzepte zur Verfügung stehen. Aus trainingswissenschaftlicher Perspektive sind jedoch Forschungsdefizite in folgenden Problempunkten zu sehen (vgl. hierzu auch Taha & Thomas, 2003; Hellard et al., 2006).

- › **Trainingsinput:** Die modellseitige Begrenzung des Trainingsinputs auf lediglich *eine Variable* führt dazu, dass trainingsmethodisch relevante Belastungsfaktoren (Umfang, Intensität, Dauer und Dichte), über die verschiedene Adaptationsmechanismen angesteuert werden sollen, unzureichend differenziert werden können.
- › **Leistungsoutput:** Die Modellanpassung an die individuelle Adaptationschronologie der Athletin bzw. des Athleten und damit auch die Prognosegüte ist dann am besten, wenn die Leistungskennwerte möglichst *engmaschig* erhoben werden. Diese restriktiven Anforderungen erlauben es selbst in den konditionell determinierten Sportarten nur in seltenen Fällen, den Leistungsoutput in Form der *komplexen sportlichen Leistung* zeitlich äquidistant zu quantifizieren.
- › **Veränderung der Adaptationschronologie:** Die bisher entwickelten Modelle arbeiten mit konstanten Verzögerungsparametern, so dass unabhängig von der trainingsmethodischen Gestaltung der Belastungsnormative (Umfang und Intensität) eine zeitlich identisch verzögerte positive bzw. negative Trainingswirkung angenommen wird. Diese Annahme widerspricht der Erkenntnis, dass die zeitliche Dauer der Wiederherstellungs- und Anpassungsprozesse ganz entscheidend von Umfang und Intensität der körperlichen Belastung abhängt.

Die zentrale Zielstellung des Projekts bestand daher in der *Weiterentwicklung des antagonistischen PerPot-Metamodells* im Hinblick auf die drei im vorherigen Abschnitt genannten Forschungsdefizite. Grundlage bildete das PerPot-Modell, da nach Sichtung der Literatur und der eigenen Erfahrungen mit den beiden antagonistischen Modelltypen deutliche Vorzüge gegenüber dem FF-Modell sowohl bei der Modellanpassung als auch der Prognosegenauigkeit bestehen. Das PerPot-Metamodell soll zur Trainingswirkungsanalyse dahingehend weiterentwickelt werden, dass modellseitig mehrere Inputvariablen zur Beschreibung der Trainingsbelastung (Belastungsfaktoren) genutzt werden können. Als Basisgrößen können hierbei der **Trainingsumfang** und die **Trainingsintensität** angesehen werden. Die Modellmodifikation wurde unter Berücksichtigung der Besonderheiten in den **Ausdauersportarten** vorgenommen und am Beispiel des **Radsports** umgesetzt, wobei der Transfer auf andere konditionell determinierte Sportarten mitgedacht wurde.

## 2 Methode

Im Rahmen des geförderten Betreuungsprojekts wurden in einem Untersuchungszeitraum von Dezember 2011 bis Juni 2012 (37 Wochen) Trainings- und Leistungsdaten von insgesamt fünf Radsportlern erfasst. Die prozessorientierte Modellierung und Simulation der Relationen von Trainingsinput und Leistungsoutput (PerPot-Modell) macht es erforderlich, dass die Trainings- und Leistungsdaten sowohl ökonomisch als auch trainingsprozessbegleitend mit einer hohen Dichte an Einzelmessungen erhoben werden.

Tab. 1: Angaben zu den untersuchten Radsportlern

	Fahrer				
	S1	S2	S3	S4	S5
Disziplin	Straße				
Alter Studienbeginn	17	17	17	16	18
Körpergröße [cm]	174	180	179	189	182
Trainingsumfang	ca. 18 Tkm pro Jahr	ca. 17 Tkm pro Jahr	ca. 18 Tkm pro Jahr	ca. 16 Tkm pro Jahr	ca. 18 Tkm pro Jahr
Körpergewicht [kg]	61,2 ± 0,6	68,3 ± 0,9	60,8 ± 0,6	73,3 ± 5,0	66,1 ± 0,6
Untersuchungs- zeitraum*	VP1 bis WP2 (32 Wo.)				

\* VP = Vorbereitungsperiode; WP = Wettkampfperiode

## 2.1 Trainingsdiagnostik (Trainingsinput)

Die *Trainingsbelastungen* wurden im gesamten Untersuchungszeitraum über die Tretkurbel mittels des SRM-Systems (Fa. Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Deutschland) ermittelt. Die verwendeten SRM-Leistungsmess-Systeme wurden bereits im Rahmen zahlreicher wissenschaftlicher Studien validiert, demzufolge sie repräsentative und wissenschaftlich verwertbare Messwerte liefern (Paton & Hopkins, 2001; Faiss et al., 2007; Vogt et al., 2007).

Zur Ermittlung der *Trainingsbeanspruchung* wurde die Herzfrequenz bei jeder Trainingseinheit aufgezeichnet (Polar RS800) und hieraus so genannte arbiträre Trainingseinheiten (TRIMP) berechnet (Banister, 1982; Millet et al., 2002).

## 2.2 Leistungsdiagnostik (Leistungsoutput)

Ausgehend von der dargelegten Belastungsstruktur im Radsport, den empirischen Befunden sowie den einschränkenden Rahmenbedingungen einer trainingsprozessbegleitenden Diagnostik wurden im Rahmen der Studie zwei unterschiedliche Testverfahren zur Ermittlung des Leistungszustandes der Fahrer zweimal (Vorbereitungsperiode) bzw. einmal (Wettkampfperiode) wöchentlich eingesetzt. Drei Fahrer absolvierten einen *Stufentest*, zwei Fahrer einen *5-Minuten-All-Out-Test*.

## 2.3 Stufentest

Der im Original als  $VO_{2max}$ -Test bezeichnet Stufentest wurde in Anlehnung an die Ausführungen von Stapelfeldt et al. (2006) ohne Spirometrie durchgeführt (Startwert 150 W, Stufenhöhe 10 W, Stufendauer 10 s). Der Test wurde bis zum Abbruch (Ausbelastung) gefahren, was zu einer Belastungsdauer zwischen 3 und 8 Minuten führte. Als Kenngröße der aeroben Leistungsfähigkeit wurde die bis zum Abbruch erreichte mechanische Arbeit (kJ) definiert. Der Leistungstest wurde auf dem eigenen Fahrrad mit einem Cyclus II Bremsaggregat (Fa. RBM elektronik-automation GmbH, Leipzig, Deutschland) gefahren. Die Testabnahme erfolgte am Morgen jeweils zur gleichen Tageszeit, um den Einfluss des circadianen Zyklus möglichst gering zu halten. Nach einer standardisierten Einfahrphase von 7 Minuten bei 100 Watt, unterbrochen durch drei 5-s-Sprints, begann die eigentliche Testphase. Den Abschluss des Testprogramms bildet eine 5-minütige Regenerationsphase bei 50 Watt.

## 2.4 5-Minuten-All-Out-Test

Der Test wurde mit dem eigenen Fahrrad auf einem Rollentrainer (Tacx Booster T2500) absolviert. Zur Bestimmung der radspezifischen Leistungsfähigkeit wurde die durchschnittliche Leistung in Watt ermittelt (Ein- und Ausfahrprogramm siehe Stufentest). Analog zum Stufentest erfolgte die Testabnahme am Morgen jeweils zur gleichen Tageszeit.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Modellentwicklung

Ausgehend vom aktuellen Forschungsstand sollten mit der Modellentwicklung folgende zwei Problempunkte gelöst werden:

- Abbildung des Trainings differenziert nach Trainingsumfang und -intensität.
- Dynamische Anpassung der Verzögerungsparameter (Delays) im Verlauf des Trainingsprozesses.

Mit dem Performance Potential Double Model (PerPotDoMo) wird ein antagonistischer Modellansatz zur Trainingswirkungsanalyse vorgestellt, der es erstmals ermöglicht, die Trainingseffekte auch in Abhängigkeit der Gestaltung von Trainingsumfang und -intensität zu untersuchen (Perl & Pfeiffer, 2011) (Abb. 1).

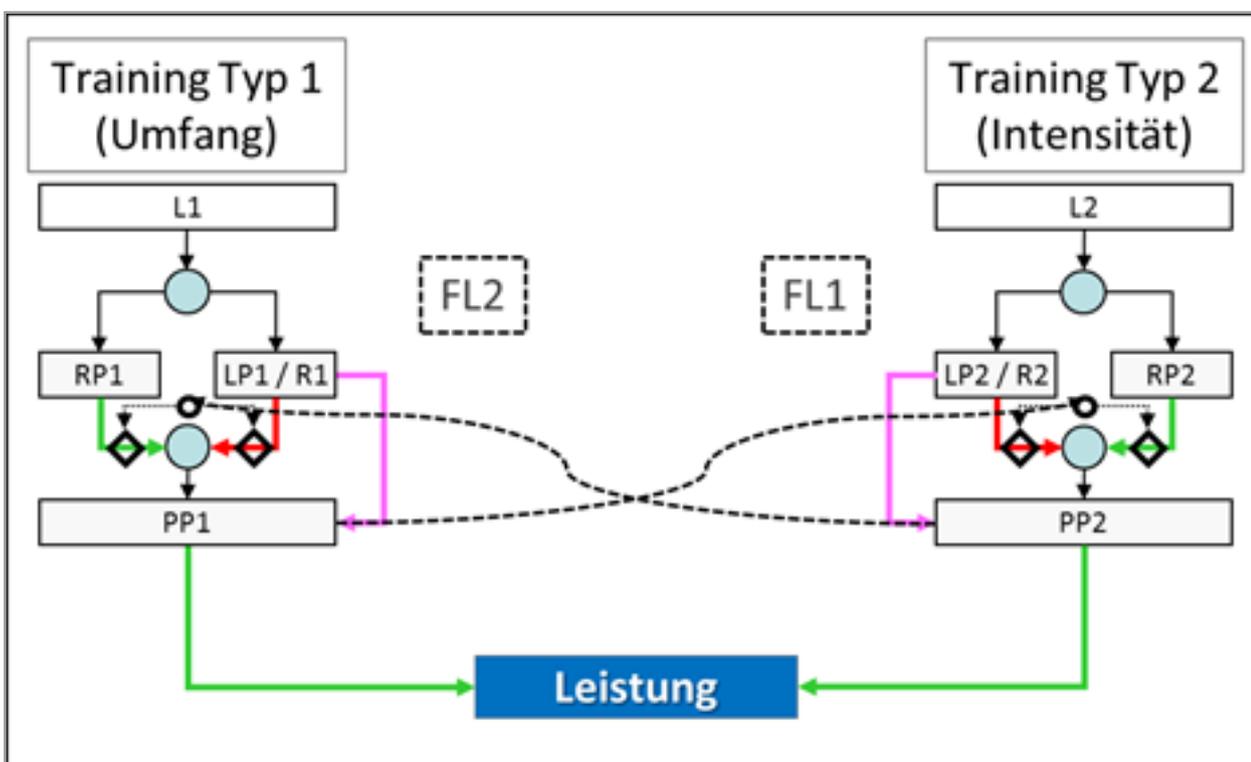


Abb. 1: Performance Potential Double Model (PerPotDoMo): Verbindung zweier PerPot-Metamodelle mit zwei Trainingsinput-Variablen (L1 und L2) und dynamischer Steuerung der Verzögerungsparameter durch die Flüsse (FL1 und FL2) des jeweils anderen Outputs (PP1 und PP2)

Das PerPot DoMo beinhaltet zwei PerPot-Modelle, deren Basis-Struktur aus dem zentralen Strukturelement „Performance-Potential“ (PP) besteht, welches über Flüsse in Abhängigkeit von einer Trainingsbelastung (L) veränderbar ist. Die beiden Leistungspotentiale (PP1 und PP2) bestimmen den Zustand der (sportlichen) Leistung bzw. Leistungsfähigkeit. Die Wirkungen auf die beiden PPs sind dabei grundsätzlich von der Zeit (t) abhängig. Bei der eingehenden Trainingsbelastung können die beiden Typen „Trainingsumfang“ und „Trainingsintensität“ unterschieden werden. Sie werden über die Zeit in gleicher Weise in einem Strain-Potential SP(t) und einem Response-Potential RP(t) zwischengespeichert, wobei das SP(t) abbauend (negativ) und das RP(t) aufbauend (positiv) auf das Leistungspotential PP(t) wirkt. Da diese Wirkungen üblicherweise zeitverzögert eintreten, wurden Verzögerungsparameter für die Potentiale „Strain“ ( $\diamond$ ) und „Response“ ( $\diamond$ ) implementiert, die entsprechend der gewählten Zeitskala konkrete Hinweise über die Dauer des positiven und negativen Einflusses liefern (Abb. 1). Um das Phänomen des Übertrainings (Kollaps-Effekt) modellseitig nachzubilden, wurde ein Überlauf (Overflow) implementiert (R). Der Überlauf wird aktiviert, wenn die vorher im Rahmen der Kalibrierung festgelegte Kapazitätsgrenze von SP überschritten wird. Die Verzögerung des Überlaufs ist deutlich geringer als die von „Strain“ ( $\diamond$ ) und „Response“ ( $\diamond$ ), so dass bei Aktivierung des Überlaufs die Leistungsminderung unmittelbar erfolgt.

Weil über die wechselseitigen Wirkungsbeziehungen von Trainingsumfang und -intensität im Hinblick auf die Veränderung der Leistung bzw. Leistungsfähigkeit nach Recherche der Literatur keine hinreichenden exakten Vorannahmen getroffen werden konnten, von einer linearen Beziehung nicht ausgegangen werden kann und die Wechselwirkungen nach aktuellem Erkenntnisstand von höchst individueller Prägung sind, wurde eine dynamische Steuerung der Verzögerungsparameter durch die Flüsse (FL1 und FL2) des jeweils anderen Outputs (PP1 und PP2) gewählt (Abb. 1). Dies zeigte sich im Rahmen der empirischen Modellprüfung als äußerst erfolgreiche Strategie, nicht zuletzt entsprach es den Erfahrungen der Trainingspraxis.

### 3.2 Modellanwendung

Im Projekt wurde zur Trainingswirkungsanalyse im Radsport, d. h. der Modellierung und Simulation der Wechselwirkung zwischen sportlichem Training (Input) und radsportspezifischer Leistungsfähigkeit (Output) sowohl das im Projekt entwickelte PerPotDoMo als auch das „einfache“ PerPot (Perl, 2001) verwendet. Um die wissenschaftliche Güte des PerPotDoMo einzuschätzen, wurden die Ergebnisse der Modellanpassung und Prognosegüte mit denen des PerPot verglichen. Die Weiterentwicklung kann dann als zufriedenstellend angesehen werden, wenn sich mit dem PerPotDoMo gegenüber dem PerPot mit nur einem Trainingsinput und konstanten Verzögerungsparametern bessere Ergebnisse erzielen lassen.

Für die Trainingswirkungsanalyse mit dem *PerPot* wurde das Training tageweise in Form der erbrachten Arbeit in der Größe Energieverbrauch in Kilojoule (kJ) bzw. Wattsekunde (Ws) quantifiziert.

Das *PerPotDoMo* erfordert die tageweise Berechnung des Trainings differenziert nach Trainingsumfang und -intensität. Der Trainingsumfang wurde über die Trainingsdauer (in Sekunden) ermittelt, die Trainingsintensität anhand der im Radsport gebräuchlicher fünf Intensitätsbereiche als durchschnittliche Intensität des pro Tag absolvierten Trainings berechnet.

Die simulative Trainingswirkungsanalyse wurde zunächst nur für vier Fahrer (S1-3 und S5) durchgeführt, da bei S4 aufgrund schulischer Verpflichtungen und infektdingter Trainingspausen nur phasenweise ein strukturiertes Training umgesetzt werden konnte und daher eine hohe Schwankungsbreite der Leistungskurve festzustellen ist.

Die Prüfung der *Modellanpassung* erfolgte zum einen für den gesamten Untersuchungszeitraum – je nach Fahrer zwischen 32 und 34 Wochen – und zum anderen für folgende Trainingsperioden (Makrozyklen): 1. *Vorbereitungsperiode* (VP), 2. *VP und Wettkampfperiode* (WP)<sup>1</sup> (Tab. 1). Als Maß für die Modellanpassung wurde die mittlere relative Abweichung zwischen empirischen und berechneten Leistungswerten (mittl. Abw. %) ermittelt. Für den gesamten Untersuchungszeitraum wurde zusätzlich der Intra-Class-Korrelationskoeffizient (ICC; einfach, zufällig) für die beiden Datenreihen bestimmt. Während die erste Prüfgröße vor allem aus trainingspraktischer Sicht wichtige Informationen zur Genauigkeit der individuellen Simulation bereitstellt, jedoch nicht für den Vergleich zwischen den Individuen herangezogen werden kann, informiert der ICC über die Anpassung an den Datenverlauf, d. h. die Dynamik der Leistungsentwicklung. Der ICC ermöglicht einen interindividuellen Vergleich der Simulationsergebnisse.

Der Unterschied zwischen den beiden Modellen wurde *statistisch* mittels t-Test geprüft ( $p < 0.05$ ). Aufgrund der geringen Fallzahl von nur vier Fahrern wurden hierfür die Einzelwerte (mittl. Abw. %) der vier Trainingsphasen herangezogen.

Die Ergebnisse für den gesamten Untersuchungszeitraum (UZ) zeigen, dass mit dem PerPotDoMo sowohl bei der mittleren Abweichung von den realen Leistungswerten (mittl. Abw. [%]) als auch dem ICC bessere Ergebnisse erzielt werden konnten (Tab. 2).

Tab. 2: *Modellanpassung für den gesamten Untersuchungszeitraum (UZ), die 1. Vorbereitungsperiode (VP1), die 2. VP (VP2), die 3. VP (VP3) und die 1. Wettkampfperiode (WP1) – mittlere relative Abweichung zwischen realen und simulierten Leistungswerten (mittl. Abw. [%]); Intra-Class-Korrelationskoeffizient (ICC); arithmetischer Mittelwert (M)*

	PerPot					PerPotDoMo				
	mittl. Abw. [%]				ICC	mittl. Abw. [%]				ICC
	VP1	VP2	WP	UZ	UZ	VP1	VP2	WP	UZ	UZ
S1	1,58	2,71	1,99	4,16	.422	1,53	2,82	2,06	3,79	.644
S2	0,95	1,16	2,4	2,34	.579	0,69	1,28	2,3	1,59	.759
S3	1,22	1,51	2,5	2,85	.705	0,92	1,38	2,42	2,02	.726
S5	3,9	3,33	2,61	5,74	.588	3,9	2,52	2,99	3,94	.827
<b>M</b>	<b>1,91</b>	<b>2,18</b>	<b>2,38</b>	<b>3,77</b>	<b>.58</b>	<b>1,76</b>	<b>2,00</b>	<b>2,44</b>	<b>2,84</b>	<b>.75</b>

Demgegenüber konnten für die einzelnen Trainingsperioden (VP1, VP2 und WP) keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Modellen festgestellt werden ( $t(11) = 2.43, p = .594$ ).

Anhand der mittleren relativen Abweichung von simulierten und realen Leistungswerten lassen sich Einschätzungen im Hinblick auf die Anpassungsgüte lediglich unter Berücksichtigung der Leistungsfluktuation von Messzeitpunkt zu Messzeitpunkt und der Leistungsveränderungen im Untersuchungszeitraum vornehmen.

In Anbetracht der enormen Leistungsveränderungen und den z. T. beachtlichen Leistungsschwankungen kann das Simulationsergebnis für den gesamten Untersuchungszeitraum als befriedigend eingeschätzt werden.

1 Aufgrund der geringen Leistungswerte in der 2. Wettkampfperiode (WP2) wurden die beiden Trainingsetappen WP1 und WP2 zusammengefasst.

Um die *Prognosegenauigkeit* zu prüfen, wurde das PerPotDoMo mit den realen Trainings- und Leistungsdaten getrennt nach den Trainingsperioden VP1, VP2 und WP1 kalibriert. Mit den so für jeden Fahrer individuell ermittelten Modellparametern wurden die Leistungen für die jeweils nachfolgende Periode ausschließlich auf Grundlage der Trainingsdaten simuliert. Die mittlere relative Abweichung zwischen den empirischen und den prognostizierten Leistungswerten bildete die Grundlage zur Einschätzung der Prognosegüte. Zur besseren quantitativen Einschätzung der Ergebnisse können die im Rahmen der Modellanpassung für die jeweilige Trainingsperiode simulierten Leistungswerte, genauer deren mittlere relative Abweichung von den Originaldaten, herangezogen werden.

Der Unterschied zwischen den beiden Modellen wurde *statistisch* mittels t-Test geprüft ( $p < 0.05$ ). Aufgrund der geringen Fallzahl von nur vier Fahrern wurden hierfür pro Fahrer die Einzelwerte der drei Prognosen (mittl. Abw. %) herangezogen.

Für alle drei Trainingsperioden konnte mit dem PerPotDoMo gegenüber dem PerPot eine bessere Prognosegenauigkeit erreicht werden ( $t(10) = 4.42, p = .000$ ) (Tab. 3).

Tab. 3: Prognose basierend auf den Trainingskennwerten: mittlere relative Abweichung (%) zwischen realen und simulierten Leistungswerten – simulierte Leistungswerte (sim.); prognostizierte Leistungswerte (prog.); arithmetischer Mittelwert (M)

	PerPot						PerPotDoMo					
	sim. VP2	prog. VP2	sim. WP1	prog. WP1	sim. WP2	prog. WP2	sim. VP2	prog. VP2	sim. WP1	prog. WP1	sim. WP2	prog. WP2
S1	2,71	9,12	1,28	6,07	0,48	2,9	2,82	6,45	1,78	3,41	1,73	2,69
S2	1,16	7,52	2	14,97	1,21	3,49	1,28	3,06	1,82	4,11	1,95	4,09
S3	1,51	6,97	1,84	3,85	1,3	12,84	1,38	2,1	1,82	2,51	2,23	6,19
S5*	3,33	7,89	2,61	4	-	-	2,52	5,17	2,99	4,25	-	-
<b>M</b>	<b>1,91</b>	<b>7,88</b>	<b>1,93</b>	<b>7,22</b>	<b>1,00</b>	<b>6,41</b>	<b>2,00</b>	<b>4,20</b>	<b>2,10</b>	<b>3,57</b>	<b>1,97</b>	<b>4,32</b>

\* Aufgrund der geringen Anzahl an Leistungswerten in der WP2 wurde hier auf eine Berechnung verzichtet.

## 4 Diskussion

Mit dem PerPotDoMo wurde ein antagonistischer Modellansatz präsentiert, mit dem es erstmals möglich ist, die Relation zwischen Training und Leistung unter der Berücksichtigung von Trainingsumfang und -intensität abzubilden. Damit wurde ein wesentlicher Kritikpunkt an den bisherigen Modellen aufgenommen und gelöst.

Die Ergebnisse zur *Modellanpassung* verdeutlichen eindrucksvoll, dass insbesondere für längere Zeiträume eine differenzierte Abbildung des Trainings in zwei Belastungsparametern zu einer Verbesserung der Modellgüte beiträgt. Für kürzere Zeiträume (z. B. Makrozyklen) konnten keine Unterschiede zwischen den beiden Modellvarianten festgestellt werden. Dies lässt sich damit begründen, dass die untersuchten Trainingsperioden nach trainingsmethodischen Gesichtspunkten unterteilt wurden und somit innerhalb dieser Umfang und Intensität keine größere Schwankungsbreite aufwiesen. Die Zusammenfassung des Trainings in nur einer Kenngröße stellt demzufolge auch keinen großen Informationsverlust dar.

Für die *Prognosegenauigkeit* konnte gezeigt werden, dass die dynamische Steuerung der zeitlichen Verzögerung von Trainingseffekten über die Belastungsnormative Umfang und Intensität nicht nur angesichts der empirischen Befundlage als lohnend angesehen werden muss, sondern dass dies auch zu einer substantiellen Erhöhung der Prognosegüte beiträgt. Mögliche Veränderungen der Anpassungszeiten im Prognosezeitraum, die trainingsmethodisch (Zyklisierung/Periodisierung) begründet sind, wirken sich nicht mehr negativ auf das Prognoseergebnis aus, sondern lassen sich mit dem PerPotDoMo durch die interne Steuerung der Verzögerungsparameter abbilden.

Insgesamt bleibt zu konstatieren, dass aufgrund der vorliegenden Ergebnisse von Modellanpassung und Prognosegenauigkeit die simulationsbasierte Trainingswirkungsanalyse mittels PerPotDoMo grundsätzlich geeignet erscheint, flankierend mit anderen Maßnahmen den Trainingsprozesses im Radsport zu optimieren. Mit dem Projektergebnissen konnten somit zumindest einige der von Taha und Thomas (2003) sowie Hellard et al. (2006) vorgebrachten Kritikpunkte an den bisherigen Arbeiten zum FF-Modell ausgeräumt werden.

## 5 Literatur

- Banister, E. W. (1982). Modeling Elite Athletic Performance. In J. D. MacDougall, H. W. Wenger & H. J. Green (Eds.), *Physiological Testing of Elite Athletes* (pp. 403-425). Champaign IL: Human Kinetics.
- 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.
- Faiss, R., Praz, M., Meichtry, A., Gobelet, C., & Deriaz, O. (2007). The effect of mountain bike suspensions on vibrations and off-road uphill performance. *Journal of sports medicine and physical fitness*, 47 (2), 151-158.
- Hellard, P., Avalos, M., Lacoste, L., Barale, F., Chatard, J. C., & Millet, G. P. (2006). Assessing the limitations of the Banister model in monitoring training. *Journal of sports science*, 24 (5), 509-520.
- Mester, J., & Perl, J. (2000). Grenzen der Anpassungs- und Leistungsfähigkeit aus systematischer Sicht - Zeitreihenanalyse und ein informatisches Metamodell zur Untersuchung physiologischer Adaptationsprozesse. *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 (1), 55-63.
- Paton, C. D., & Hopkins, W. G. (2001). Tests of cycling performance. *Sports medicine*, 31 (7), 489-496.
- Perl, J. (2001). PerPot: A metamodel for simulation of load performance interaction. *European journal of sport science*, 1 (2), 1-13.
- Perl, J. (2002). Adaptation, Antagonism and System Dynamics. In G. Ghent, D. Kluka & D. Jones (Eds.), *Perspectives - The Multidisciplinary Series of Physical Education and Sport Science*, 4 (pp. 105-125). Oxford: Meyer & Meyer Sport.
- Perl, J., & Pfeiffer, M. (2011). PerPot DoMo: Antagonistic Meta-Model Processing two Concurrent Load Flows. *International journal of computer science in sport*, 11 (1).
- Stapelfeldt, B., Lohmüller, D., Schmid, A., Röcker, K., Schumacher, Y. O., & Gollhofer, A. (2006). Prädiktiver Wert physiologischer und biomechanischer Testverfahren zur Differenzierung leistungsbestimmender Faktoren im Radsport. In Bundesinstitut für Sportwissenschaft (Hrsg.), *BISp-Jahrbuch Forschungsförderung 2005/06* (S. 179-184). Köln: Sportverlag Strauß.
- Taha, T., & Thomas, S. G. (2003). Systems modelling of the relationship between training and performance. *Sports medicine*, 33 (14), 1061-1073.
- Vogt, S., Schumacher, Y. O., Blum, A., Roecker, K., Dickhuth, H. H., Schmid, A., & Heinrich, L. (2007). Cycling power output produced during flat and mountain stages in the Giro d'Italia: a case study. *Journal of sports science*, 25 (12), 1299-1305.