

Modellgestützte Leistungsdiagnostik: Ein Simulationsmodell zur rechnergestützten Leistungsdiagnostik in der Sport- und Präventivmedizin

A. Schulte-Thomas, F. Dörrscheidt, H. Liesen (Projektleiter)

Sportmedizinisches Institut und
Fachgebiet Regelungstechnik
Universität Paderborn

1 Problem

In den heute üblichen Verfahren zur Leistungsdiagnostik wird der Verlauf typischer Stoffwechselgrößen bei verschiedenartigen körperlichen Belastungsformen gemessen. Anschließend werden die experimentell ermittelten Messdaten mit statistischen Normwerten verglichen und daraus Rückschlüsse auf die individuelle metabolische Leistungsfähigkeit gezogen.

Bei der Auswahl der zu messenden Stoffwechselgrößen ist man aus ethischen Gründen auf messtechnisch leicht erfassbare Größen beschränkt. Diese Größen lassen jedoch häufig nur indirekte Rückschlüsse auf die zu analysierenden Stoffwechselprozesse zu. Meist werden in leistungsdiagnostischen Untersuchungen standardisierte Belastungsmuster verwendet, welche die untersuchten Stoffwechselprozesse nicht immer optimal anregen. Für eine zuverlässige Bewertung der metabolischen Leistungsfähigkeit ist daher Vorwissen über die untersuchte Person ebenso wichtig wie ausreichende Erfahrung in der Leistungsdiagnostik und fundierte Kenntnisse der biologischen Wirk- und Regelungsmechanismen.

2 Methode

Um das Verhalten von komplexen geregelten Systemen zu verstehen, werden vor allem für technische, zunehmend aber auch für biologische und medizinische Aufgabenstellungen Methoden der mathematischen Modellbildung und der Simulation eingesetzt (MADER 1994; KRACHT et al. 1994). Auch die Bewertung der metabolischen Leistungsfähigkeit kann durch den Einsatz eines individuell parametrierbaren Simulationsmodells effektiv unterstützt werden, da sich in Simulationsexperimenten zusätzlich zu den zeitdiskret gemessenen Stoffwechselgrößen weitere, z.B. muskelinterne Größen, zeitkontinuierlich beobachten lassen. Darüber hinaus können in Simulationen beliebige Belastungsformen untersucht werden, auch solche, die im Grenzbereich der

menschlichen Leistungsfähigkeit liegen. Durch Simulationsexperimente können die biochemischen Wirkungsmechanismen in ihrer Vielfältigkeit und ihren gegenseitigen Interaktionen besser verstanden werden. Das Konzept der modellgestützten Leistungsdiagnostik führt damit zu qualitativen wie quantitativen Verbesserungen in der Bewertung der metabolischen Leistungsfähigkeit und damit letztendlich auch zu einer effektiveren Trainingsgestaltung.

3 Ergebnis

Mit finanzieller Unterstützung des Bundesinstituts für Sportwissenschaft wurde ein Simulationsmodell für die Vorgänge des Energiestoffwechsels entwickelt, das für Menschen mit unterschiedlicher metabolischer Leistungsfähigkeit bei beliebigen Belastungen kurz- und mittelfristiger Dauer den Verlauf muskelinterner Größen zuverlässig nachbildet. Im folgenden wird der Aufbau des Simulationsmodells erläutert.

Aufbau des Simulationsmodells

Aufgrund der Komplexität und der hierarchischen Struktur des Energiestoffwechsels hat sich der Einsatz von objektorientierten Methoden zur Modellbildung als ideal erwiesen. Wesentliches Merkmal dieser Methoden ist, dass komplexe Systeme durch eine hierarchische Strukturierung in übersichtlicher Weise auf einfacher zu modellierende Teilsysteme zurückgeführt werden. Die Wechselwirkungen der Teilsysteme untereinander werden durch Verkopplungen über definierte Schnittstellen beschrieben.

Dieses Vorgehen ist in Abbildung 1 für den Energiestoffwechsel dargestellt. In der obersten Hierarchieebene ist der gesamte Wirkungsbereich des Energiestoffwechsels unter topologischen Gesichtspunkten in kleinere, als homogen angenommene Verteilungsräume zerlegt. Diese sind die in Abbildung 1 dargestellten Kompartimente *kontrahierende Muskulatur*, *passive Muskulatur*, *Leber* und *Blut*. Der Stoffaustausch zwischen den Kompartimenten wird durch Diffusionsprozesse hergestellt.

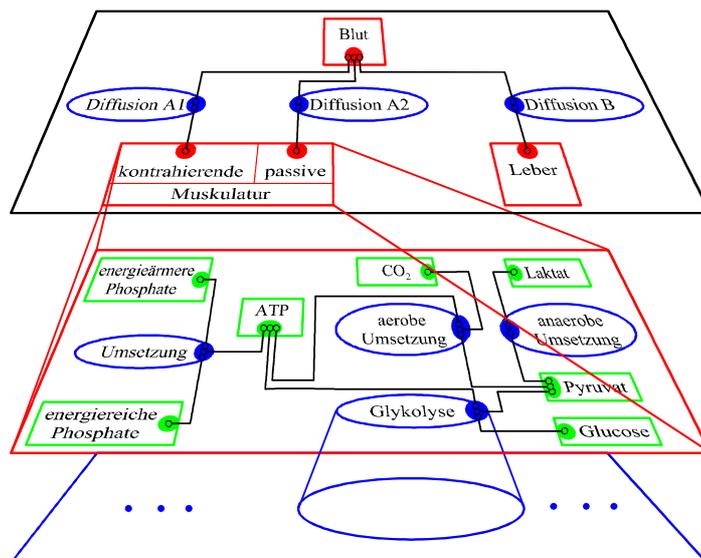


Abb. 1: Hierarchischer Aufbau des Simulationsmodells

In den nächsten Gliederungsebenen werden die Stoffwechselfvorgänge innerhalb der einzelnen Kompartimente unter phänomenologischen Gesichtspunkten durch *Speicher-* und *Reaktionssysteme* beschrieben. *Speichersysteme* sind elementare, das heißt nicht weiter zerlegbare Bausteine, die für körpereigene Depots von Stoffwechselmetaboliten stehen. *Reaktionssysteme* können auf den oberen Gliederungsebenen noch ganze Stoffwechselketten, wie die *Glykolyse*, oder auch einzelne Reaktionen, wie die *Adenylatkinase-Reaktion*, beinhalten. Alle nichtelementaren *Reaktionssysteme* dieser Hierarchieebene werden in den darunterliegenden Ebenen auf die elementaren *Reaktionssysteme* wie reversible Reaktion, irreversible Reaktion, *regulatorische Reaktion*, *passive freie Diffusion*, *passive erleichterte Diffusion* und *aktive Diffusion* zurückgeführt.

Das dynamische Verhalten jedes elementaren Teilsystems wird durch seine Systemgleichungen mathematisch beschrieben, die auf grundlegenden physikalischen und biochemischen Gesetzen beruhen.

Hier zeigt sich ein weiterer Vorteil der objektorientierten Modellbildung, der in Verbindung mit objektorientierten Programmieretechniken genutzt werden kann: Die mathematische Beschreibung eines elementaren Teilsystems kann häufig auf viele konkrete Teilsysteme des Simulationsmodells übertragen werden. Diese wird zunächst einmalig als abstraktes Objekt in einer Modellbibliothek abgelegt. Die Eigenschaften dieses Objekts werden anschließend auf die konkreten Teilsysteme vererbt. Eventuelle Änderungen der Systembeschreibung können demzufolge schnell an wenigen Stellen des Programmcodes vorgenommen werden.

Zur Erstellung der mathematischen Gesamtbeschreibung werden die einzelnen Teilsysteme entsprechend den zuvor definierten Schnittstellen miteinander verknüpft und die Gleichungen sukzessive „von unten noch oben“ zusammengefügt. Dieser Vorgang wird durch die Verwendung eines rechnergestützten Modellbildungswerkzeugs, ebenso wie die anschließende Erstellung des Simulationscodes, weitgehend automatisiert.

4 Diskussion

Das resultierende mathematische Gesamtmodell enthält zahlreiche Parameter, die für den praktischen Einsatz in der Leistungsdiagnostik geeignet festzulegen sind. Die Wertebereiche vieler Modellparameter können anhand von Angaben in der Fachliteratur bestimmt werden. Die individuelle Anpassung des Simulationsmodells erfolgt auf der Grundlage experimenteller Untersuchungsergebnisse.

In einer ersten Pilotstudie konnte gezeigt werden, dass es nach einer individuellen Anpassung des Modellparametersatzes möglich ist, das dynamische Verhalten der betrachteten Stoffwechselprozesse unter verschiedensten Randbedingungen zuverlässig und realitätsgetreu zu simulieren. Das gemessene und das simulativ berechnete Laktat-Leistungsverhalten zeigen bei unterschiedlichsten Belastungsformen eine hohe qualitative wie quantitative Übereinstimmung (Abbildung 2).

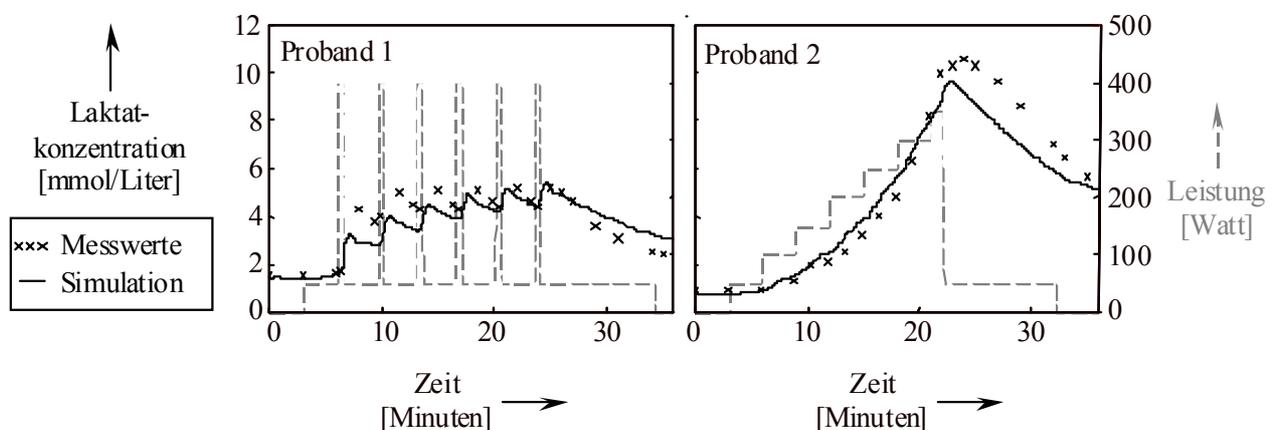


Abb. 2: Leistungsabgabe und Laktatkonzentration bei verschiedenen Belastungstest für verschiedene Probanden

Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass typische, aus der Literatur bekannte Eigenschaften des menschlichen Energiestoffwechsels nachgebildet werden können: So stimmen die simulierten zeitlichen Verläufe intrazellulärer Größen und die simulierten zeitlichen Verläufe der Leistungsbereitstellung durch verschiedene

Stoffwechselmechanismen während und nach der Belastung sehr gut mit dem Verhalten überein, das in der Literatur angegeben wird.

5 Literatur

- MADER, A.: Energiestoffwechselregulation, Erweiterungen des theoretischen Konzepts und seiner Begründungen - Nachweis der praktischen Nützlichkeit der Simulation des Energiestoffwechsels. In: MADER, A.; ALLMER, H. (Hrsg.): Brennpunkte der Sportwissenschaft, Computersimulation. Sankt Augustin 1994
- KRACHT, P.; MENKE, N.F.; DÖRRSCHEIDT, F.; LIESEN, H.: Modellbildung und Simulation biologischer Systeme in der Humanleistungsphysiologie. In: MADER, A.; ALLMER, H. (Hrsg.): Brennpunkte der Sportwissenschaft, Computersimulation. Sankt Augustin 1994
- SCHULTE, A.; KRACHT, P.; DÖRRSCHEIDT, F.; LIESEN, H.: Ein Simulationsmodell für den menschlichen Energiestoffwechsel: Modellbildung, Parametrierung und Validierung. In: Automed'99. Darmstadt 1999, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 17. Düsseldorf 1999

