

<sup>1</sup>Heck H, <sup>2</sup>Beneke R

## 30 Jahre Laktatschwellen – was bleibt zu tun?

*30 Years of Lactate Thresholds – what remains to be done?*

<sup>1</sup>Fakultät für Sportwissenschaft, Lehrstuhl für Sportmedizin und Sporternährung, Ruhr-Universität Bochum

<sup>2</sup>Centre for Sports and Exercise Science, Department of Biological Sciences, University of Essex

### ZUSAMMENFASSUNG

Die aerob-anaerobe Schwelle definierte 1976 erstmals einen Punkt der Laktatleistungskurve, als a) Belastungsgrenze zwischen rein aerober und partiell anaerober laktazider Energiebereitstellung, b) Indikator der Ausdauerleistungsfähigkeit und c) Maß der Belastungssteuerung im Ausdauertraining. Nachfolgende Laktatschwellenkonzepte bestimmten ausgewählte Veränderungen der Laktatleistungskurve auf Grundlage theoretischer Konzepte der Laktatbildung bzw. -verstoffwechslung oder beruhten auf im Training beobachtete Laktatkonzentrationen. Untersuchungen zum höchsten Steady State der Laktatkonzentration bei konstanter Dauerleistung, maxLass, auch MLSS genannt, validierten die Grundidee einer Belastungsgrenze zwischen aerober und partiell anaerober Energiebereitstellung. Schwellenwerte, aber auch andere Leistungen an willkürlich gewählten Punkten der Kurve korrelieren vergleichbar hoch mit der Leistung am maxLass oder mit der Wettkampfleistung im Ausdauersport und eignen sich zur Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit. Die Form der Laktatleistungskurve und alle Schwellenwerte ändern sich bei verschiedenen Belastungsprogrammen. Die Vergleichbarkeit leistungsdiagnostischer Befunde ist aktuell unzureichend. Datenbestände von Untersuchungszentren sollten genutzt werden, um Referenzwerte und Transferfunktionen für unterschiedliche Untersuchungsmethoden und Schwellenkonzepte zu erstellen und durch allgemeine Vergleichbarkeit von Befunden die Laktatleistungsdiagnostik an Standards der klinischen Diagnostik anzugleichen. Prospektive und prozessbegleitende Trainingsstudien sollten das fragmentale Wissen bezüglich Laktat und spezifischer Trainingswirkungen systematisch ergänzen. Modelltheoretische Methoden der Hypothesenbildung und -testung zur Analyse von Zusammenhängen zwischen (sub-)zellulärer Belastungsanpassung und physiologischen Phänomenen wie der Laktatleistungskurve sind weitgehend ungenutzte Forschungsressourcen.

**Schlüsselwörter:** Laktatleistungskurve, Maximales Laktat Steady State, Leistungsdiagnostik, Training

### EINLEITUNG

Das Zeitalter der laktatbasierten Schwellenkonzepte begann 1976 mit der Publikation: „Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor“ von Mader et al. (12). Ziel der vorliegenden Arbeit ist:

1. die Entwicklung der Laktatschwellenkonzepte seit 1976 zu beschreiben,
2. bestehende Forschungsdefizite und mögliche Forschungsperspektiven aufzuzeigen.

### SUMMARY

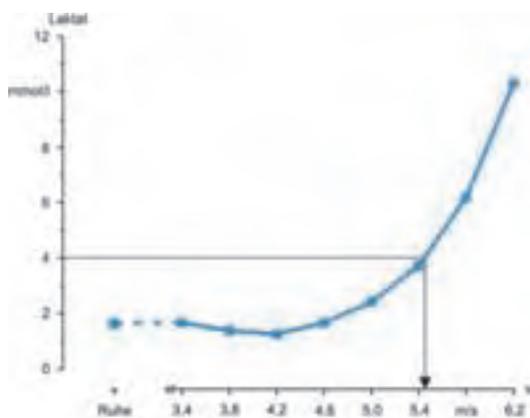
In 1976, the aerobic-anaerobic threshold first defined a point on the lactate power curve as a) a transition from aerobic to partly anaerobic energy metabolism, b) an indicator of aerobic performance and c) a means of predicting exercise intensities in endurance training. Subsequent threshold concepts detected selected changes of the lactate power curve either based upon theories concerning lactate formation and utilisation or on empirical training observations. Studies on the highest steady state of lactate during prolonged constant workload, termed maxLass or MLSS, support the idea of a transition from aerobic to partly anaerobic energy metabolism. The shape of the lactate power curve and corresponding thresholds are testing-protocol dependent. Thresholds as well as performances at other arbitrarily-selected points on the lactate power curve correlate comparably well with MLSS power and maximum endurance performance. There is no consistent theory or experimental evidence for an interrelationship between MLSS, MLSS exercise intensity and aerobic performance, nor that thresholds indicate superior training intensities. Mechanisms linking lactate concentrations with specific training effects remain unclear. There is no need for new lactate threshold concepts. Existing data should be used to identify reference values in order to adjust lactate performance testing to biomedical standards. Prospective and observatory training studies should advance knowledge regarding the meaning of specific lactate concentrations for achieving defined training effects. Computer modelling appears to be underused in developing and testing hypotheses on complex effects related to new findings at (sub-)cellular level and their meaning for exercise testing, lactate power curve and training.

**Key words:** Lactate power curve, maximal lactate steady state, performance testing, methods, training

### EIN PUNKT AUF DER LAKTATLEISTUNGSKURVE

Die 76er-Publikation von Mader et al. (12) brachte zwei Neuerungen in der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung:

1. Definition und physiologische Begründung eines Punktes („aerob-anaerobe Schwelle“) auf der Laktatleistungskurve als Kriterium zur Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit.
2. Angabe von Intensitätsbereichen zur Trainingssteuerung anhand der Laktatleistungskurve.



**Abbildung 1:** Bestimmungsmethode der „aerob-anaeroben Schwelle bei 4 mmol.l<sup>-1</sup> Laktat nach Mader et al. (modifiziert nach (4)).

Mader et al. (12) definierten die „aerob-anaerobe Schwelle“ als den Bereich des Übergangs zwischen der rein aeroben zur partiell anaeroben laktazid gedeckten muskulären Energiestoffwechselleistung der Arbeitsmuskulatur unter den gegebenen Belastungsbedingungen und legten die Schwelle bei einem Laktatwert von 4 mmol.l<sup>-1</sup> fest (Abb. 1).

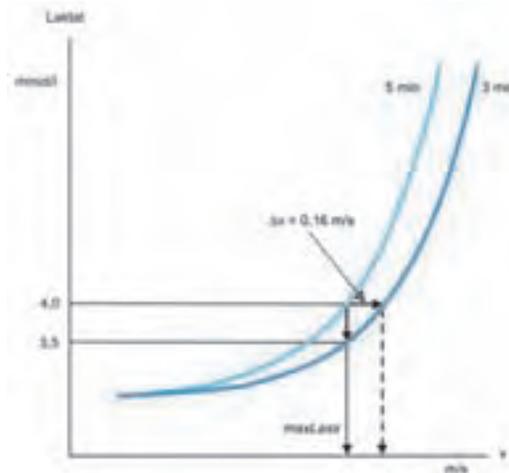
Der Schwellenlaktatwert von 4 mmol.l<sup>-1</sup> bezog sich dabei auf ein stufenförmiges Belastungsschema auf dem Laufbandergometer mit einer Stufendauer von 5 min und einer Abstufung der Laufbandgeschwindigkeit von 0,4 m.s<sup>-1</sup>. Dieses Konzept resultierte aus der Beobachtung, dass die einer Laktatkonzentration von 4 mmol.l<sup>-1</sup> entsprechenden Belastungen im Mittel über längere Zeit toleriert werden konnten, ohne dass das Laktat im Verlauf der Belastung nach einem anfänglichen Anstieg weiter zunahm. Höhere Belastungen, die nach relativ kurzer Zeit zur Erschöpfung führten, hatten in der Regel einen deutlich höheren Anstieg des Laktats zur Folge.

Zusätzlich zur Leistungsdiagnostik sollte die Laktatschwelle der Steuerung der Belastungsintensität im Training dienlich sein. Extensives Ausdauertraining mit Streckenlängen von 5 bis 8 km sollte unterhalb der Schwelle, intensives Dauerlauftraining mit Streckenlängen von 3 bis 5 km im Bereich der Schwelle, und intensive Laufbelastungen sollten oberhalb der Schwelle durchgeführt werden (12). Die nachfolgende Umsetzung dieser Trainingsempfehlungen wurde jedoch nur von Sportlern mit geringer Ausdauerleistungsfähigkeit gut toleriert. Athleten mit einer hohen Ausdauerleistungsfähigkeit waren zu hoch belastet. Daraus resultierte die Vermutung eines mit zunehmender Ausdauer abnehmenden Laktatwertes an der Schwelle und führte zur Entwicklung von Laktatschwellenkonzepten mit individuellem Schwellenlaktat.

## WEITERE SCHWELLENKONZEPTE

Zahlreiche Arbeitsgruppen beschäftigten sich mit der Entwicklung neuer Laktatschwellenkonzepte. Die daraus resultierende Anzahl ist schwer festzulegen und möglicherweise um den Faktor 5 bis 10 größer als die nachfolgend beschriebene exemplarische Auswahl.

Das erste Konzept, welches berücksichtigte, dass die Krümmung der Laktatleistungskurve interindividuell unterschiedlich ist, war 1979 die „**Individuelle anaerobe Schwelle**“ nach Keul et al. (11). Ausgehend von der Annahme, dass 4 mmol.l<sup>-1</sup> die Schwelle im



**Abbildung 2:** Laktatleistungskurven bei der Laufbandergometrie mit einer Stufendauer von 5 sowie 3 min bezogen auf das maximale Laktat-Steady-state (modifiziert nach (4)); Verschiebung der aerob-anaeroben Schwelle um 0,16 m.s<sup>-1</sup> nach rechts bei von 5 auf 3 min reduzierter Stufendauer (horizontaler Pfeil), Verschiebung des Schwellenlaktatwertes bei gleicher Leistung von 4 auf 3,5 mmol.l<sup>-1</sup> (vertikaler Pfeil).

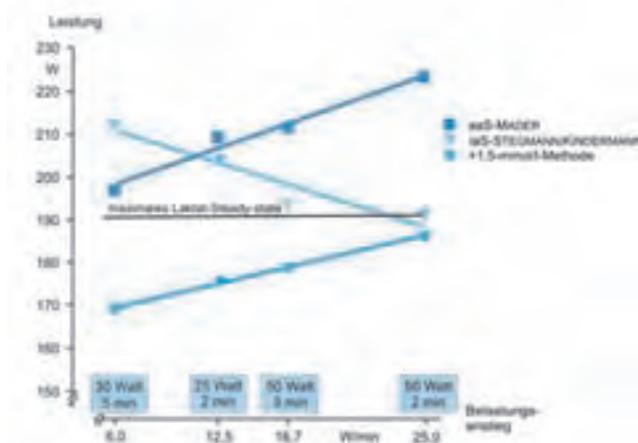
Mittel korrekt bestimmt, ermittelten Keul et al. an der Laktat-Laufbandgeschwindigkeitskurve den Tangentenwinkel bei 4 mmol.l<sup>-1</sup>. Die „individuelle anaerobe Schwelle“ wurde dann als die Belastung definiert, bei der die Krümmung der Laktatleistungskurve einem Tangentenanstieg von  $\tan \alpha = 1,26 \text{ (mmol.l}^{-1})/(\text{km.h}^{-1})$  entspricht.

Davis/Gass (3) definierten ebenfalls 1979 zwei Schwellen, die „**Anaerobic threshold (AT1 und AT2)**“. AT1 bestimmt die Leistung in einem stufenförmigen Belastungstest, die vor einem systematischen Anstieg der Laktatkonzentration liegt. Hiervon abgegrenzt wurde AT2, die mit zwei aufeinander folgenden identischen Stufentests ermittelt wurde. Der zweite Test startete somit mit hohen Laktatwerten, die während der zweiten Belastung zunächst abfielen, um bei höheren Belastungsstufen letztlich wieder anzusteigen. AT2 war durch die niedrigste Laktatkonzentration im zweiten Test bestimmt. Der „**Senkentest**“ nach Tegtbur et al. (19) ist eine Modifikation des Verfahrens zur Bestimmung von AT2. Er ersetzt den ersten Stufentest durch eine hochintensive Vorbelastung gefolgt von einer 8-minütigen Pause mit einem anschließenden Stufentest.

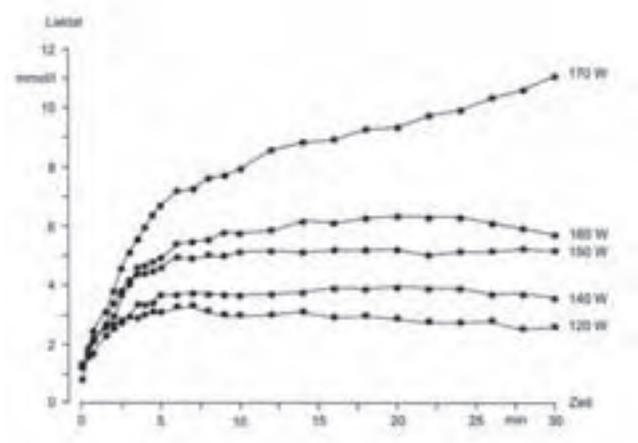
Ausgehend von den Bestimmungen AT1 und AT2 (3) suchten Davis et al. 1983 (2) nach einer Methode, AT1 und AT2 mit Hilfe nur eines Belastungstests zu ermitteln. Sie definierten die „**Anaerobic threshold (AT)**“ identisch mit AT1 als „ersten breakpoint“ der Laktatleistungskurve. Zusätzlich bestimmten sie einen „**Lactate turnpoint (LTP)**“ als Leistung kurz vor einer zweiten scharfen Erhöhung der Anstiegsrate der Laktatkonzentration als „zweiten breakpoint“.

Der „**Onset of Blood Lactate Accumulation (OBLA)**“ nach Sjödin et al. (17) ist die in anglo-amerikanischen Lehrbüchern am häufigsten genannte Schwelle. Leider wurde und wird der Begriff OBLA widersprüchlich benutzt. In der Originalarbeit von Sjödin et al. (17) ist OBLA identisch mit der „aerob-anaeroben Schwelle“ fixiert bei 4 mmol.l<sup>-1</sup> Laktat, obwohl die Schwelle als die Belastung definiert wurde, bei der Laktat exponentiell anzusteigen beginnt (onset of blood lactate accumulation), was der AT1 (3) entspricht.

Die „**individuelle anaerobe Schwelle (ias)**“ wurde 1981 von Stegmann/Kindermann definiert als der Zeitpunkt bzw. als die



**Abbildung 3:** Mittelwerte verschiedener Laktatschwellenkonzepte in Abhängigkeit vom Belastungsanstieg und im Vergleich zum maxLass (modifiziert nach (4)).



**Abbildung 4:** Blutlaktatkurven eines Probanden während mehrerer Versuche mit konstanter Belastung am Drehkurbelergometer zur Bestimmung des maxLass (modifiziert nach (4)).

Belastung, an dem bzw. bei der die maximale Eliminationsrate und die Diffusionsrate des Laktats im Gleichgewicht stehen (18). Für die Eliminationsrate wird angenommen, dass sie bei steigender Blutlaktatkonzentration einem Maximum zustrebt und danach konstant bleibt. Solange das Maximum nicht erreicht ist, stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Diffusion und Elimination ein. In einem Laktat-Zeit-Diagramm wird vom Laktatwert der Erholungsphase, der dem Laktatwert am Ende der Belastung gleich ist, eine Tangente an die Laktatzeitkurve gelegt. Die Leistung am Berührungspunkt bestimmt die iaS und die Steigung der Tangente die maximale Eliminationsrate.

„**Individuelle anaerobe Schwelle**“ nach **Simon und Dickhuth et al.** . Simon (16) beschreibt 1986 erstmalig die „+1,5-mmol.l<sup>-1</sup>-Methode“ und sieht die „individuelle anaerobe Schwelle“ bei einer Laktatkonzentration von 1,5 mmol.l<sup>-1</sup> oberhalb der aeroben Schwelle, also des ersten Laktatanstiegs auf den unteren Belastungsstufen. Dickhuth et al. (7) legten 1988 die individuelle anaerobe Schwelle bei der Laktatkonzentration fest, die, ausgehend von der Laktatkonzentration am Punkt des Laktatäquivalents (entspricht in der Regel der Basislaktatkonzentration), durch Addition von 1,5 mmol.l<sup>-1</sup> Laktat berechnet wird. Ausführungen in der Literatur lassen vermuten, dass die „+1,5-mmol.l<sup>-1</sup>-Methode“ aus der Beobachtung von Trainingslaktatwerten entstanden ist (6, 16).

### LAKTAT BRAUCHT SEINE ZEIT

Alle Laktatschwellen werden mit stufenförmig ansteigenden Belastungsprogrammen bestimmt. Bei sprunghaftem Anstieg der Belastung passt sich die Laktatkonzentration mit Verzögerung an die neue Leistung an. Je kürzer die Stufendauer bzw. je höher die Leistungssteigerung pro Stufe, desto mehr ist die Laktatleistungskurve nach rechts verschoben (Abb.2).

Den Effekt von vier unterschiedlichen Testprotokollen auf drei häufig bestimmte Laktatschwellen bei Fahrradergometrie zeigt Abbildung 3.

Alle 3 Schwellenkonzepte, die aerob-anaerobe Schwelle, die iaS und die +1,5-mmol.l<sup>-1</sup>-Schwelle, waren vom Testprotokoll abhängig. Erwartungsgemäß stiegen die Leistungen an der ae-

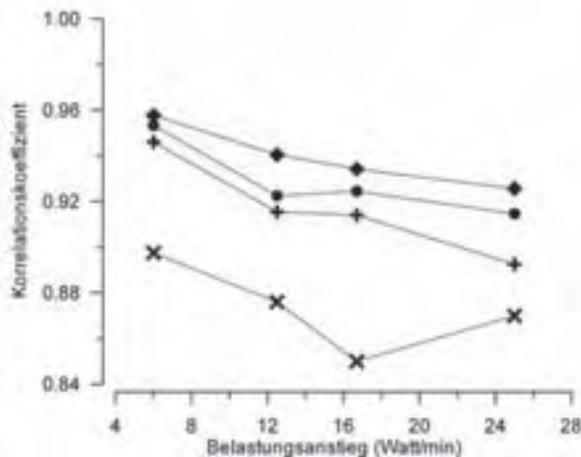
rob-anaeroben Schwelle und an der +1,5-mmol.l<sup>-1</sup>-Schwelle mit zunehmendem Belastungsanstieg an. Im Gegensatz dazu nahm die Leistung an der iaS in gleichem Maße ab (9). Auch beim Senkentest (in Abb.3 nicht dargestellt) zeigten die Schwellenwerte eine Abhängigkeit vom Belastungsanstieg. Im Mittel stieg die „Laktat-Senke“ um 2 W pro 1 W.min<sup>-1</sup> höherem Belastungsanstieg an (10).

### MAXIMALES LAKTAT-STEADY-STATE

Ab 1980 wurden Validierungsuntersuchungen zur aerob-anaeroben Schwelle durchgeführt (8). Sie basierten auf Dauerbelastungsuntersuchungen zur Bestimmung des maximalen Laktat-Steady-State [maxLass oder MLSS], der höchsten Laktatkonzentration, bei der sich während konstanter Dauerleistung ein nahezu konstanter Laktatwert einstellt. Das maxLass stellt somit kein eigenständiges Schwellenkonzept dar, sondern ist ein Begriff, der im Rahmen der Validierung der Mader'schen Schwellendefinition entstand. Da das maxLass-Verfahren den Übergang zwischen rein aerobem und partiell anaerobem laktaziden Energiestoffwechsel direkt bestimmt, wird es häufig als „goldener Standard“ zur Validierung von Laktatschwellen benutzt.

Als maxLass wurde die Belastung definiert, bei der das Laktat in den letzten 20 Minuten einer 30-minütigen Dauerbelastung nicht mehr als 1 mmol.l<sup>-1</sup> ansteigt (8). Eine ähnliche Definition des maxLass geben Urhausen et al. an (20). Zahlreiche andere publizierte Methoden zur Bestimmung des maxLass, die das Zeitverhalten der Laktatkonzentration nicht hinreichend berücksichtigen, messen zu niedrige maxLass-Laktatwerte und -Leistungen (1).

Der initiale Anstieg des Laktats ist typisch für gleichzeitige Bildung und Elimination eines Substrats, wobei die Elimination von der Substratkonzentration abhängig ist. Stellt sich nach 5 bis 15 min ein Laktat-Steady-State oder ein Abfall der Laktatkonzentration ein, ist der Energiestoffwechsel des Gesamtkörpers aerob. Die fortlaufend glykolytisch gebildete Milchsäure wird dann in gleichem Maße als Substrat des aeroben Stoffwechsels verwertet (Abb.4: 120-160 W). Auch bei kontinuierlich ansteigender Laktatkonzentration wird Laktat gleichzeitig erzeugt



**Abbildung 5:** Korrelationskoeffizienten zwischen maxLass und verschiedenen Schwellenwerten in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Belastungsanstiegs. aaS-Mader (+), iaS-Stegmann (x), Leistung bei 5 (●) und 7 (◆) mmol.l<sup>-1</sup> Laktat.wv

und eliminiert. Die Laktatbildung ist jetzt jedoch größer als die Eliminationsrate (Abb.4: 170 W). Der daraus über die Belastungszeit resultierende Anstieg der Laktatkonzentration kennzeichnet den partiellen anaeroben laktaziden Anteil am Energiestoffwechsel aller stoffwechselaktiven Gewebe.

Die in Abbildung 4 nach 12 min bei einer Leistung von 160 W nahezu konstante Laktatkonzentration von ca. 5,5 mmol.l<sup>-1</sup> kennzeichnet somit eine in der Bilanz aerobe Stoffwechselsituation.

Obwohl die Laktatkonzentration in Abb. 4 bei 170 W während der letzten 20 Belastungsminuten von 8 auf 11 mmol.l<sup>-1</sup> anstieg, ist der anaerob-laktazide Energieanteil sehr gering. Der Anstieg der Laktatkonzentration um 1 mmol.l<sup>-1</sup> entspricht einer mechanischen Energie von ca. 13,8 J pro kg Körpermasse (5). Somit ergibt der Anstieg von 3 mmol.l<sup>-1</sup> in den letzten 20 min bei 170 W eine relative anaerob-laktazide Energiebereitstellung von lediglich ca. 1,4% am Muskelstoffwechsel einer 70kg schweren Person. Die vereinzelt geäußerte Meinung, dass der muskuläre Energiestoffwechsel bei Leistungen oberhalb der aerob-anaeroben Schwelle überwiegend anaerob laktazid abläuft, ist somit falsch.

Die Validierung von Laktatschwellen wird an anderer Stelle dieses Heftes ausführlich behandelt. Daher soll hier nur auf einen schwellenübergreifenden Befund hingewiesen werden. Bei Änderung der Ausdauerleistungsfähigkeit verändert sich nicht nur die Schwelle zu höheren oder niedrigeren Leistungswerten, sondern die gesamte Laktatleistungskurve. Damit erfährt jeder Punkt auf der Kurve eine Rechts- oder Linksverschiebung. Für die Ausgangsdaten in Abb. 3 wurden Korrelationen zwischen maxLass und aaS, iaS sowie den Leistungswerten bei 5 und 7 mmol.l<sup>-1</sup> Laktat berechnet. Die Befunde in Abbildung 5 lassen sich zum einen dahingehend deuten, dass die Bestimmung der Leistung bei höheren Laktatwerten tendenziell zu höheren Korrelationskoeffizienten führt und sich zum anderen mit schnellerem Belastungsanstieg geringere Korrelationskoeffizienten ergeben. Dies bedeutet jedoch nicht, die bisherige schwellenorientierte Ausdauerleistungsdiagnostik aufzugeben, sondern es soll nur ein Hinweis dafür sein, dass Laktatschwellen lediglich Punkte auf der Laktatleistungskurve sind, denen keine größere Bedeutung als anderen Werten im steilen Teil der Kurve zukommt.

## FAZIT

Die erste Publikation einer Laktatschwelle definierte die „aerob-anaerobe Schwelle“ als den Bereich des Übergangs zwischen der rein aeroben zur partiell anaeroben laktazid gedeckten muskulären Energiestoffwechselleistung. Unter gegebenen Testbedingungen kennzeichnete sie im Mittel die höchste Dauerleistung, bei der Pyruvat-Laktatbildungsrate und oxidativer Pyruvat-Laktatabbau gleich sind. Die Messung des höchsten Steady State der Laktatkonzentration, das sich bei konstanter Dauerleistung einstellt, maxLass oder auch MLSS genannt, validierte die Grundidee einer Belastungsgrenze, die zwischen aerober und partiell anaerober Energiebereitstellung trennt. Die verschiedenen Laktatschwellenkonzepte lassen sich drei Gruppen zuordnen:

1. Schwellen, die indirekt das maxLass bestimmen sollen (2, 3, 11, 12, 17, 18, 19).
2. Schwellen, die den ersten Anstieg der Laktatleistungskurve kennzeichnen (2, 3).
3. Schwellen, die wahrscheinlich von Trainingslaktatwerten abgeleitet wurden (7, 16).

Alle bekannten Laktatschwellenkonzepte bestimmen Leistungen, die in hohem Maße vom Belastungsanstieg im Stufentest abhängen.

## WAS BLEIBT ZU TUN?

Die vorausgegangenen Ausführungen verdeutlichen, dass Laktatschwellen als spezielle Punkte der Laktatleistungskurve keine höhere Bedeutung für Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung haben als andere Punkte der Kurve. Die Tatsache, dass mehr als 30 Jahre Fokus auf unterschiedliche Schwellenkonzepte das diagnostische Potenzial der Laktatleistungskurve möglicherweise nicht wirklich nutzte, ist jedoch kein Argument, laktatgestützte Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung aufzugeben. Sie kennzeichnet vielmehr erheblichen Forschungsbedarf.

## Referenzwerte

Sucht man in der Literatur nach Referenzwerten für Laktatschwellen, dann sind die Angaben dürftig. Zumeist handelt es sich um Daten aus nicht repräsentativen Stichproben, und die Personenzahl ist klein oder bei größeren Stichproben sind die Daten nicht als Referenzwerte statistisch aufbereitet (14, 15).

Zahlreiche sportmedizinische Institute, leistungsdiagnostische Zentren, Olympiastützpunkte und das Institut für Angewandte Trainingswissenschaft haben mittlerweile über Jahrzehnte Leistungssportler, Freizeitsportler und Patienten leistungsdiagnostisch betreut. Dabei wurden viele tausend Laktatleistungskurven mit unterschiedlichen Methoden gemessen, nach verschiedenen Konzepten interpretiert und häufig in Datenbanken gespeichert. Diese Daten sind zur Objektivierung der Laktatleistungsdiagnostik ein zur Zeit ungenutztes Kapital. Pooling dieser Daten ergäbe ausreichende Stichprobenumfänge für Referenzwerte. In zahlreichen Sportarten wurden die Spitzensportler über viele Jahre regelmäßig untersucht, so dass hier sogar Stichprobenrepräsentanz gegeben ist. Für unterschiedliche Testprotokolle und Test- und Analysegeräte müssten jedoch anhand experimenteller Untersuchungen Verfahren entwickelt werden, die eine beliebige Transformation

der Laktatleistungskurven verschiedener Untersuchungszentren ermöglichen. Falls die gepoolten Daten als geeignete Rohdatensätze vorliegen, können zusätzlich Referenzwerte für alle bekannten Schwellenkonzepte bestimmt werden.

Die Erstellung solcher Referenzwerte würde die Laktatleistungsdiagnostik an anerkannte Standards der klinischen Diagnostik angleichen. In der Folge steigert sich die Chance, laktatgestützte Untersuchungen zu vereinheitlichen. Dabei könnten alle in verschiedenen Einrichtungen etablierten Routinen berücksichtigt werden.

### Trainingsstudien

Prospektive randomisierte Trainingsstudien mit einem differenzierten Studiendesign bezogen auf Kontrollbedingungen wie keinem bzw. unverändertem Training, eindeutiger Intervention definiert durch Trainingsmittel, -umfang, laktatbezogene Intensität und klaren Hypothesen zur Trainingswirkung bzw. Leistungsentwicklung des Gesamtorganismus in Abhängigkeit von Gewebs-, Zell- und molekularer Funktion und Adaptation stehen aus.

Solche Studien sind im Hochleistungssport kaum durchführbar. Randomisiert zugewiesene standardisierte Trainingsinhalte sind mit den wechselnden Anforderungen und Zwängen einer Wettkampfsaison im Spitzenport schwer oder nicht vereinbar. Unter der Annahme, dass erfolgreiche Sportler basierend auf umfangreicher Erfahrung zumindest anstreben, „annähernd optimal“ zu trainieren, ist die retrospektive Analyse von Trainings- und Wettkampflaktatkonzentrationen unter Berücksichtigung von Saisonplanung, -durchführung und Leistungsverlauf dieser Sportler eine bisher nur ansatzweise genutzte Ressource. Ihre Nutzung setzt allerdings voraus, dass Sportler und Trainer bereit und in der Lage sind, die notwendigen Daten zur Verfügung zu stellen.

Weiterhin stehen systematische Untersuchungen zur Wirkung von Krafttraining auf das Laktatverhalten noch aus. Es gibt Hinweise in der Literatur, dass vor allem die Krümmung der Laktatleistungskurve durch Krafttraining beeinflusst wird (13).

### Integrative Forschung

Obwohl die Laktatleistungskurve möglicherweise eine der häufigst beschriebenen physiologischen Akutreaktionen kennzeichnet, war der langjährige Fokus auf unterschiedliche, zumeist empirisch begründete Laktatschwellenkonzepte für das Verständnis der physiologischen Grundlagen der Laktatleistungsdiagnostik nicht hilfreich. Der Transfer neuer Erkenntnisse zum Energiestoffwechsel und Laktat auf zellulärer und molekularer Ebene in die Leistungsdiagnostik blieb weitgehend aus.

Letzteres ist darin begründet, dass die Laktatleistungskurve die Summe aller bekannten und unbekanntenen Faktoren widerspiegelt, die Laktat im Blut ansteigen bzw. abfallen lassen. Die statistische Analyse auf (sub-)zellulärer Ebene gewonnener Daten und deren verbale Interpretation im Sinne eines wissenschaftlichen Konsenses wurden im letzten Jahrzehnt zum nahezu ausschließlichen Gegenstand biologisch/physiologischer Forschungsförderung. Obgleich unverzichtbar zum Verständnis physiologischer Grundlagen, war diese Strategie zum weiteren Verständnis komplexer in vivo Bedingungen, z.B. im Verteilungsraum Blut, nur von sehr begrenztem Nutzen. Systemtheoretische Betrachtungen ermöglichen die objektive Analyse komplexer Modelle sowohl multipler Mechanismen auf (sub-)zellulärer Ebene als auch deren Wirkung auf den Gesamtorganismus. Forschungsprogramme, wie

sie zum Beispiel im Rahmen des „Wissenschaftlichen Verbundsystems im Leistungssport“ (Bundesinstitut für Sportwissenschaft), des „Achieving Gold“ und des „Life Science Interface“ Programms (beide Engineering and Physical Sciences Research Council UK) ausgeschrieben wurden, deuten darauf hin, dass das Potential multidisziplinärer systemtheoretischer Forschungsansätze auch für den Bereich der angewandten Physiologie und Sportmedizin zunehmend anerkannt wird. Die damit verbundenen Chancen für innovative Forschung im Bereich von Laktatleistungsdiagnostik und Training sollten nicht ausgelassen werden.

*Angaben zu finanziellen Interessen und Beziehungen, wie Patente, Honorare oder Unterstützung durch Firmen: keine*

### LITERATUR

1. **BENEKE R:** Methodological aspects of maximal lactate steady state: implications for performance testing. *Eur J Appl Physiol* 89 (2003) 95-99.
2. **DAVIS HA, BASSETT J, HUGHES P, GASS GC:** Anaerobic threshold and lactate turnpoint. *Eur J Appl Physiol* 50 (1983) 383-392.
3. **DAVIS HA, GASS GC:** Blood lactate concentrations during incremental work before and after maximum exercise. *Br J Sports Med* 13 (1979) 165-169.
4. **DE MARÉES H:** Sportphysiologie. Sport und Buch Strauß, Köln 2003.
5. **DI PRAMPERO PE:** Energetics of muscular exercise. *Rev Physiol Biochem Pharmacol* 89 (1981) 143-222.
6. **DICKHUTH HH, AUFENANGER W, SCHMIDT P, SIMON G, HUONKER M, KEUL J:** Möglichkeiten und Grenzen der Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung im Mittel- und Langstreckenlauf. *Leistungssport* 19 (1989) 21-24.
7. **DICKHUTH HH, WOLFARTH B, HILDEBRAND D, ROKITZKI L, HUONKER M, KEUL J:** Jahreszyklische Schwankungen der Ausdauerleistungsfähigkeit von hochtrainierten Mittelstreckenläufern. *Dtsch Z Sportmed* 39 (1988) 346-353.
8. **HECK H, HESS G, MADER A:** Vergleichende Untersuchung zu verschiedenen Laktat-Schwellenkonzepten. *Dtsch Z Sportmed* 36 (1985) 19-25, 40-52.
9. **HECK H, ROSSKOPF P:** Grundlagen verschiedener Laktatschwellenkonzepte und ihre Bedeutung für die Trainingssteuerung. In: Clasing D, Weicker H, Böning D (Hrsg.): Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. G. Fischer, Stuttgart 1994, 111-131.
10. **HECK H, ROSSKOPF P, HIRSCH A, HOBERG T, HOPPE W, REICHWEIN R:** Einfluß des Vorbelastungslaktats, der Pausendauer und des Belastungsanstiegs auf die Laktat-Senke. *Dtsch Z Sportmed* 42 (1991) 248-263.
11. **KEUL J, SIMON G, BERG A, DICKHUTH H-H, GOERTTLER I, KÜBEL R:** Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle zur Leistungsbewertung und Trainingsgestaltung. *Dtsch Z Sportmed* 30 (1979) 212-216.
12. **MADER A, LIESEN H, HECK H, PHILIPPI H, ROST R, SCHÜRCH P, HOLLMANN W:** Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor. *Sportarzt und Sportmedizin* 27 (1976) 80-88, 109-112.
13. **PANSOLD B, ZINNER J:** Die Laktat-Leistungskurve – ein Analyse- und Interpretationsmodell der Leistungsdiagnostik im Schwimmen. In: Clasing D, Weicker H, Böning D (Hrsg.): Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. G. Fischer, Stuttgart 1994, 47-64.
14. **ROECKER K, NIESS AM, HORSTMANN T, STRIEGEL H, MAYER F, DICKHUTH HH:** Heart rate prescriptions from performance and anthropometrical characteristics. *Med Sci Sports Exerc* 34 (2002) 881-887.
15. **ROECKER K, SCHOTTE O, NIESS AM, HORSTMANN T, DICKHUTH HH:** Predicting competition performance in long-distance running by means of a treadmill test. *Med Sci Sports Exerc* 30 (1998) 1552-1557.

16. **SIMON G:** Trainingssteuerung im Schwimmsport. Dtsch Z Sportmed 37 (1986) 376-379.
17. **SJÖDIN B UND JACOBS I:** Onset of blood lactate accumulation and Marathon running performance. Int J Sports Med 2 (1981) 23-26.
18. **STEGMANN H, KINDERMANN W, SCHNABEL A:** Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. Int J Sports Med 2 (1981) 160-165.
19. **TEGTBUR U, GRIESS M, BRAUMANN K-M, BUSSE M, MAASSEN N:** Eine Methode zur Ermittlung der Dauerleistungsgrenze bei Mittel- und Langstreckenläufern. In: Böning D, Braumann KM, Busse M, Maassen N, Schmidt W (Hrsg.): Sport - Rettung oder Risiko für die Gesundheit? Deutscher Ärzte-Verlag, Köln 1989, 463-466.
20. **URHAUSEN A, COEN B, WEILER B, KINDERMANN W:** Individual anaerobic threshold and maximum lactate steady state. Int J Sports Med 14 (1993) 134-139.

**Korrespondenzadresse:**  
**Prof. Dr. med. Hermann Heck**  
**Anemonenweg 5**  
**50858 Köln**  
**E-Mail: hermann.heck@rub.de**