Adaptation & Recovery – Stressantwort, Funktionsreserve und Erholung

Hintergrund und diagnostische Bedeutung des Adaptation-&-Recovery-Profils (M5)

Stresssignal · Funktionsreserve · Recovery – gemessen zu definierten Probenzeitpunkten vor und nach Belastung

Einführung

Gesundheit zeigt sich nicht allein im Ruhezustand, sondern in der Fähigkeit, auf eine Belastung angemessen zu reagieren und sich danach vollständig zu erholen. Jede körperliche, metabolische oder psychische Belastung löst eine kontrollierte zelluläre Stressantwort aus; entscheidend ist, wie stark sie ausfällt, welche Funktionsreserve dafür zur Verfügung steht und wie rasch sie sich wieder zurückbildet.

Das M5-Profil macht diese drei Ebenen messbar: das **Stresssignal** (zellfreie nukleäre und mitochondriale DNA im Plasma), die **Funktionsreserve** der Mitochondrien in Immunzellen (Bioenergetischer Gesundheitsindex, BHI) und die **Recovery** auf Ebene der Immunregulation sowie systemischer Stresshormone (GDF15, FGF21). Gemessen wird nicht nur einmal, sondern zu **definierten Probenzeitpunkten** – vor und nach einer Belastung oder im Verlauf eines Programms. Bewertet wird die Veränderung gegenüber der individuellen Baseline.

Klinische Einsatzgebiete

- Post-exertionelle Malaise (PEM) bei ME/CFS
- Post-COVID- und Post-Vakzin-Syndrome mit Belastungsintoleranz
- Verzögerte Regeneration und Übertraining im Sport
- Steuerung von Trainings-, Rehabilitations- und Pacing-Programmen
- Chronisch-entzündliche und metabolische Erkrankungen
- Prävention, Healthy Aging und Longevity-Medizin
- Verlaufskontrolle unter Mikronährstoff- und Regulationstherapie

Büroanschrift:

MMD GmbH & Co. KG
Breiter Weg 10A
39104 Magdeburg

Telefon:
(0391) 5353797

E-Mail:
mmd@mmd-web.de

Laboranschrift:

MMD GmbH & Co. KG
Im ZENIT II
Brenneckestr. 20
39118 Magdeburg

Telefon:
(0391) 6117 209

E-Mail:
labor@mmd-web.de

Geschäftsführer:

Prof. Dr. habil. Brigitte König
Rüdiger Berndt

www.mmd-labor.de

Praktischer Nutzen in der ärztlichen Anwendung

- **Objektivierbarkeit:** Belastungsintoleranz und verzögerte Erholung als messbare Stress- und Recovery-Kinetik darstellen statt nur als Beschwerdeangabe.
- **Differenzierung:** Unterscheidung zwischen angemessener Stressantwort mit vollständiger Erholung, überschießender Antwort, verzögerter Rückbildung und fehlender Funktionsreserve.
- **Belastungssteuerung:** objektive Grundlage für Trainingsdosierung, Pacing und Rehabilitationsplanung.
- **Therapielenkung:** Hinweise, ob eher die mitochondriale Funktionsreserve, die Entzündungsregulation oder die metabolische Stressachse im Vordergrund steht.
- **Verlaufskontrolle:** Vergleich von Ausgangswert, Zwischenkontrolle und Abschluss eines Programms (P0–P2) auf Grundlage messbarer Veränderungen.

Messprinzip und Achsen

Stresssignal (M5.1): Bei zellulärem Stress, gesteigertem Zellumsatz und mitochondrialer Belastung gelangen nukleäre DNA (cf-nDNA) und mitochondriale DNA (cf-mtDNA) ins Plasma. Beide steigen nach intensiver Belastung rasch an und fallen bei intakter Regulation innerhalb von Stunden wieder ab. cf-mtDNA wirkt zudem als gefahrenassoziiertes Signal (DAMP) und kann über TLR9, cGAS-STING und das Inflammasom Entzündung auslösen. Das Verhältnis cf-mtDNA/cfDNA zeigt, ob die Stressantwort überwiegend mitochondrial geprägt ist. Die Messung erfolgt im Plasma aus stabilisierenden PAXgene-ccfDNA-Röhrchen; lebende Zellen sind nicht erforderlich.

Funktionsreserve (M5.2): In lebenden PBMC werden Basalatmung, maximale Atmung, Reserveatmungskapazität, Protonenleck und nicht-mitochondrialer Sauerstoffverbrauch gemessen und auf die Mitochondrienzahl bezogen. Daraus ergeben sich metabolischer Phänotyp, die individuelle Mitochondriale Leistung (MP) und der BHI. Die Reserveatmungskapazität zeigt, wie viel zusätzliche Energie die Zelle unter Belastung bereitstellen kann. Das Modul entspricht methodisch dem BHI aus M2.

Immunregulation (M5.3): IL-6, IL-8/CXCL8, TNF-α und MCP-1/CCL2 bilden die Aktivierung ab, IL-10 die Gegenregulation. Nach Belastung ist ein vorübergehender Anstieg physiologisch – IL-6 wird dabei auch als Myokin aus der Muskulatur freigesetzt. Aussagekräftig ist daher nicht der Einzelwert, sondern die Balance aus Aktivierung und Gegenregulation und deren Rückbildung in der Erholungsphase.

Metabolische Stressantwort (M5.4): GDF15 und FGF21 sind stressinduzierte Hormone, die u. a. bei mitochondrialer Belastung über die integrierte Stressantwort gebildet werden. Sie ergänzen das Profil um die systemische und metabolische Ebene. Beide reagieren auch auf Belastungsart, Ernährungszustand (Fasten, Kohlenhydratzufuhr) und Begleiterkrankungen und werden deshalb nur im klinischen Kontext bewertet.

Module – Adaptation & Recovery

Die Module sind einzeln anforderbar. Das vollständige Adaptation-&-Recovery-Profil umfasst M5.1 bis M5.4. Die Preise auf dem Auftragsformular gelten je Probenzeitpunkt.

Achse / Modul	Parameter	Interpretation / klinische Relevanz
Cellular Stress & Recovery *M5.1 · PAXgene 1 × 10 ml*	cf-nDNA, cf-mtDNA, Verhältnis cf-mtDNA/cfDNA	Amplitude und Rückgang der zellulären bzw. mitochondrialen Stressantwort; geeignet als Einstieg sowie für Pre-/Post- und Verlaufsprofile
Mitochondrial Function (BHI) *M5.2 · CPDA 1 × 8 ml*	maximaler O_2-Verbrauch, Reserveatmungskapazität, Basalatmung, Protonenleck, Anzahl der Mitochondrien, nicht-mitochondrialer O_2-Verbrauch, metabolischer Phänotyp, MP, BHI-Index	Funktionsreserve der Immunzellmitochondrien: zeigt, ob für eine Belastung genug energetische Kapazität vorhanden ist und ob sie sich nach der Erholung wieder einstellt
Inflammation & Immune Recovery *M5.3 · EDTA 7,5 ml*	IL-6, IL-8/CXCL8, TNF-α, IL-10, MCP-1/CCL2	Balance von Aktivierung und Gegenregulation; bewertet als Veränderung gegenüber der individuellen Baseline und Rückbildung in der Recovery
Metabolic Stress & Adaptation *M5.4 · EDTA 7,5 ml*	GDF15, FGF21	ergänzende Erfassung systemischer und metabolischer Stressantworten; Bewertung im Zusammenhang mit Belastungsart, Probenzeitpunkt, Ernährungszustand und klinischem Kontext

M5.3 und M5.4 können aus demselben EDTA-Röhrchen bestimmt werden.

Probenzeitpunkte

Das Profil kann in zwei Designs angefordert werden. Die Probenzeitpunkte sind Pflichtangabe; alle Zeitangaben T1–T3 beziehen sich auf das Belastungsende.

Zeitpunkt	Abnahmefenster	Empfohlene Module
T0 – Baseline *akute Response & Recovery*	vor Belastung, nach 20–30 Minuten sitzender Ruhe	alle Module
T1 – Akutantwort *akute Response & Recovery*	5–15 Minuten nach Belastungsende	cf-nDNA/cf-mtDNA (M5.1) und Zytokinprofil (M5.3)
T2 – Frühe Erholung *akute Response & Recovery*	2 Stunden nach Belastungsende	Zytokinprofil (M5.3) und cf-nDNA/cf-mtDNA (M5.1)
T3 – Späte Erholung *akute Response & Recovery*	24 bzw. 48 Stunden nach Belastungsende	alle Module
P0 – Ausgangswert *Anpassung im Programmverlauf*	vor Programmbeginn	alle Module
P1 – Zwischenkontrolle *optional*	nach 4–6 Wochen	alle Module
P2 – Abschluss *Anpassung im Programmverlauf*	z. B. nach 8–12 Wochen	alle Module

Akute Response & Recovery erfasst die Reaktion auf eine definierte Belastung, z. B. eine Ergometrie oder einen standardisierten Belastungstest. Bei Patienten mit PEM ist T3 nach 24–48 Stunden besonders aufschlussreich, da sich eine gestörte Erholung häufig erst verzögert zeigt. Die Belastung muss bei diesen Patienten ärztlich abgewogen und dosiert werden. **Anpassung im Programmverlauf** erfasst, ob sich Ruhewerte und Funktionsreserve über Wochen durch Training, Rehabilitation oder Therapie verändern.

Befundlogik

Stresssignal, Funktionsreserve und Immunregulation werden getrennt berichtet; es wird bewusst **kein Gesamtscore** gebildet. Interpretiert wird die Kinetik über die Probenzeitpunkte:

Muster	Konstellation	Einordnung
Adaptive Antwort *Anstieg T1 · Rückkehr bis T2/T3*	moderater Anstieg von cf-DNA und Zytokinen, Rückbildung zur Baseline, BHI stabil	physiologische, gut regulierte Stressantwort mit vollständiger Erholung
Überschießende Antwort *hohe Amplitude bei T1*	deutlicher Anstieg von cf-mtDNA und proinflammatorischen Zytokinen, IL-10 relativ gering	Hinweis auf geringe Belastungstoleranz oder unzureichende Gegenregulation; Belastungsdosis prüfen
Verzögerte Recovery *erhöht bei T2 bzw. T3*	cf-mtDNA, IL-6 oder TNF-α bilden sich bis 24–48 h nicht zurück	unvollständige Erholung; typisch für PEM und Übertraining
Eingeschränkte Funktionsreserve *Reserveatmungskapazität/BHI niedrig*	geringe energetische Kapazität bereits bei T0 oder Abfall bei T3	begrenzte Belastbarkeit; mitochondriale Ursachen abklären (vgl. M1/M2)
Systemische Stressbelastung *GDF15/FGF21 erhöht*	erhöhte Stresshormone, besonders bei T0 oder persistierend bei T3	Hinweis auf mitochondriale oder metabolische Stressbelastung; Ernährungszustand und Begleiterkrankungen berücksichtigen
Adaptation im Programm *P0 → P2*	niedrigere Ruhewerte von cf-mtDNA und Zytokinen, steigende Reserveatmungskapazität bzw. BHI	erfolgreiche Anpassung an Training oder Therapie

Das M5-Profil ist ein funktionelles Profil: Es liefert keine diagnosedefinierenden Grenzwerte, sondern eine Einordnung der individuellen Stress- und Erholungskinetik im klinischen Kontext. Infekte, Verletzungen, Operationen, Schlafmangel und ungewohnte Belastung in den Tagen vor der Messung können alle Achsen beeinflussen und sollten auf dem Auftragsformular vermerkt werden.

Präanalytik – kurz

PAXgene Blood ccfDNA (M5.1): Röhrchen vollständig füllen, direkt nach der Abnahme 10× vorsichtig schwenken, unzentrifugiert bei Raumtemperatur versenden; nicht kühlen, nicht einfrieren. **CPDA (M5.2):** unzentrifugiert, ohne Kühlung über Nacht versenden, nicht einfrieren. **EDTA (M5.3, M5.4):** atraumatisch punktieren, Stauung unter 60 s,

erstes Röhrchen verwerfen (entfällt nach vorheriger Serumabnahme). Zentrifugation spätestens 2 h nach Entnahme (15 min, 2.500 g, RT, ohne bzw. mit niedriger Bremse), Plasma abnehmen und ein zweites Mal zentrifugieren (10 min, 2.500 g, RT); Versand des Plasmas bei RT, Ankunft im Labor innerhalb von 24 h.

Abnahmedatum, Uhrzeit der Abnahme und Uhrzeit der Zentrifugation sind Pflichtangaben. Röhrchen bitte mit Name, Geburtsdatum und Probenzeitpunkt beschriften; Proben verschiedener Abnahmetage getrennt versenden, jeweils mit einer Kopie des Formulars. Blutentnahme bei Abholung durch GO! Express montags bis donnerstags, bei Eigenversand (z. B. DHL Express) montags bis mittwochs, jeweils nicht vor einem Feiertag. Bitte Art, Dauer und Intensität der Belastung sowie Ernährungszustand und mitochondrienaktive Medikamente und Supplemente angeben.

Ausgewählte Literatur

1. Breitbach S, Tug S, Simon P. Circulating cell-free DNA: an up-coming molecular marker in exercise physiology. Sports Med. 2012;42(7):565–86.
2. Zhang Q, Raoof M, Chen Y, et al. Circulating mitochondrial DAMPs cause inflammatory responses to injury. Nature. 2010;464(7285):104–7.
3. Nakahira K, Kyung SY, Rogers AJ, et al. Circulating mitochondrial DNA in patients in the ICU as a marker of mortality: derivation and validation. PLoS Med. 2013;10(12):e1001577.
4. Chacko BK, Kramer PA, Ravi S, et al. The Bioenergetic Health Index: a new concept in mitochondrial translational research. Clin Sci (Lond). 2014;127(6):367–73.
5. Tessema B, Haag J, Sack U, König B. The Determination of Mitochondrial Mass Is a Prerequisite for Accurate Assessment of Peripheral Blood Mononuclear Cells' Oxidative Metabolism. Int J Mol Sci. 2023;24(19):14824.
6. Pedersen BK, Febbraio MA. Muscle as an endocrine organ: focus on muscle-derived interleukin-6. Physiol Rev. 2008;88(4):1379–406.
7. Suomalainen A, Elo JM, Pietiläinen KH, et al. FGF-21 as a biomarker for muscle-manifesting mitochondrial respiratory chain deficiencies: a diagnostic study. Lancet Neurol. 2011;10(9):806–18.
8. Kleinert M, Clemmensen C, Sjøberg KA, et al. Exercise increases circulating GDF15 in humans. Mol Metab. 2018;9:187–91.

Fazit

Das M5-Profil erfasst, wie der Organismus auf Belastung reagiert und wie vollständig er sich erholt – mit getrennt berichteten Achsen für Stresssignal, mitochondriale Funktionsreserve und Immunregulation, ergänzt um systemische Stresshormone. Durch definierte Probenzeitpunkte wird die individuelle Stress- und Recovery-Kinetik messbar. Damit entsteht eine objektive Grundlage für Belastungssteuerung, Therapieentscheidungen und Verlaufskontrolle.

Auftragsformular M5 – Adaptation & Recovery, Stand 01.11.2026 (https://www.mmd-labor.de/de/service/Auftragsformulare/)