

KI-gestützte Thermografie in der Leistungsphysiologie

Sportmedizinische Leistungsdiagnostik mit der VarioCAM® HD head 880

Wissenschaftler der Abteilung Sportmedizin, Prävention und Rehabilitation des Instituts für Sportwissenschaft der Johannes-Gutenberg-Universität (JGU) Mainz konnten in ihren neuesten Forschungsarbeiten zeigen, wie Infrarot-Thermografie und künstliche Intelligenz (KI) dabei helfen, physiologische Reaktionen auf körperliche Belastung besser zu verstehen. Mit Methoden wie StereoThermoLegs und ThermoNet lassen sich Wärmebilder automatisch auswerten, um Temperaturveränderungen an den Beinen während des Laufens oder Radfahrens präzise zu erfassen.

Johannes-Gutenberg-Universität Mainz

Institut für Sportwissenschaft

<https://www.sportmedizin.uni-mainz.de/>

Wärmebildkamera: VarioCAM® HD head 880

In der Sportmedizin gewinnt die Thermografie als nichtinvasive Messmethode zunehmend an Bedeutung. Im Rahmen einer Studie haben Wissenschaftler der JGU Mainz das Potenzial und die Anwendbarkeit des Verfahrens für dynamische Messungen in der Leistungsphysiologie untersucht. Bei den Untersuchungen fand die Arbeitsgruppe um Dr. Barlo Hillen auf der gesamten Körperoberfläche Hauttemperaturmuster, die mit ihrer baumartig verzweigten Struktur an subkutane Gefäße erinnern. Bereits in anderen wissenschaftlichen Studien wurden bei Messungen unter Belastung diese „hyperthermischen Flecken“ bzw. „thermischen kinetischen Muster“ festgestellt, doch die Ergebnisse waren aufgrund der geringen Anzahl an Probanden, verschiedener Kamerasysteme und abweichender Versuchsparameter nur eingeschränkt vergleichbar.



Abb. 1: Belastungs-induzierte Temperaturmuster auf Beinen im Ruhezustand - (© Dr. Hillen, B. et al., JGU Mainz)

Präzise Thermografie: Regionale Temperaturverläufe erstmals im Detail erfasst

Die Gruppe um Dr. Hillen führte eigene Versuche durch, welche die bisherigen Erkenntnisse bestätigen. Darüber hinaus beschreiben die Sportmediziner anhand dynamischer Messungen die Veränderungen der Hauttemperatur bzw. der Muster und zeigen, wie diese mit physiologischen Anpassungen während des Trainings zusammenhängen. Dabei wurden Verzerrungen aufgrund individueller Faktoren (z. B. der Hautdurchblutung) oder durch Umweltfaktoren minimiert. Für die Temperaturmessungen auf der Haut setzten die Wissenschaftler eine VarioCAM® HD head 880 ein, mit deren Hilfe verschiedene „regions of interest“ (ROI) – Oberkörper, Rücken und Vorderseite, vor allem aber die unteren und oberen Extremitäten – bei verschiedenen Belastungsszenarien untersucht wurden. Erstmals konnte damit auch die feine Struktur der Hauttemperaturmuster dargestellt und mit KI-Methoden ausgewertet werden.

KI-gestützte Thermografie in der Leistungsphysiologie

Sportmedizinische Leistungsdiagnostik mit der VarioCAM® HD head 880

Beim Ausdauertraining mit **konstanter Belastung** wurde anfangs – wie in anderen Studien auch – eine sinkende Hauttemperatur festgestellt, die in den oberen Gliedmaßen besonders stark ausfiel. Nach einer Weile stabilisierte sich die Temperatur und stieg wieder leicht an. Erst nach dem Training erwärmte sich die Haut deutlich. Dieser Temperaturanstieg kann mit der Entwicklung der Hauttemperaturmuster in Verbindung gebracht werden, die bei verschiedenen Arten des Ausdauertrainings am gesamten Körper festzustellen sind.

Bei ansteigender Belastung bis zur Erschöpfung (**inkrementelle Belastungstests**) wurden bisher zum Teil widersprüchliche Ergebnisse beobachtet. In eigenen Versuchen konnten Dr. Hillen und seine Mitstreiter eine Abhängigkeit der Temperaturänderung von den untersuchten ROI nachweisen. Der anfängliche Temperaturabfall war stärker als beim Ausdauertraining und zeigte einen deutlichen Zusammenhang mit der Trainingsintensität. Am Ende der Versuche waren wieder die typischen Hauttemperaturmuster zu beobachten.



Abb. 2: Belastungs-induzierte Temperaturmuster auf Beinen während der Bewegung - (© Dr. Hillen, B. et al., JGU Mainz)

Thermografisch nachgewiesene Körperreaktionen beim Krafttraining und ihre Erklärung

Noch deutlicher als bei den inkrementellen Belastungstests treten Unterschiede beim Widerstandstraining zutage. Bei diesen Tests, die weniger als 10 Minuten dauern und einem typischen Protokoll folgen, zeigen manche Studien, dass die Hauttemperatur der beanspruchten Muskeln steigt, andere, dass sie sinkt. Hierbei spielen nicht nur die ROI, sondern auch das Trainingsniveau der Probanden eine Rolle. Über spezifische Hauttemperaturmuster beim Widerstandstraining wurde in der Literatur bisher nichts berichtet. Die Arbeitsgruppe führte zwei eigene Versuche durch, ohne jedoch eindeutige Aussagen zur Unterscheidung der Belastungsintensität treffen zu können. Allerdings zeigten sich auch bei diesen Versuchen Hauttemperaturmuster, die sich von denen beim Ausdauer- oder Belastungstraining unterschieden.

Die Abnahme der Hauttemperatur beim Ausdauer- und Belastungstraining führen die Wissenschaftler auf die durch den Sympathikus gesteuerte Verengung der Blutgefäße in der Haut zurück. Dadurch wird das Blut aus der Haut umverteilt und fließt zu den Organen, die während der Belastung stärker arbeiten müssen. Es wird angenommen, dass die thermografische Messung der Hauttemperatur vor allem die Veränderungen in der Weit- und Engstellung der Blutgefäße („vasomotorischen Anpassungen“) abbildet und weniger die Veränderungen, die durch Schwitzen (Verdunstung) entstehen. Das liegt daran, dass der Körper es als effizienter betrachtet, seine Körpertemperatur durch die Weit- oder Engstellung der Blutgefäße zu regulieren, anstatt sofort durch Schwitzen zu reagieren.

KI-gestützte Thermografie in der Leistungsphysiologie

Sportmedizinische Leistungsdiagnostik mit der VarioCAM® HD head 880

Deshalb ist die Thermografie besonders gut geeignet, die Veränderungen in der Blutgefäßregulation zu Beginn der körperlichen Anstrengung und bei steigender Belastungsintensität festzustellen – und das, ohne stark durch Schwitzen beeinflusst zu werden. Dass sich bei zunehmender Belastung ein bestimmtes, immer deutlicher werdendes Muster in den Blutgefäßen zeigt, unterstützt diese Annahme.

Mit steigender Kerntemperatur gibt der Körper zunehmend Wärme an die Umgebung ab, um sich abzukühlen. Die „baumartige“ Struktur, welche die Infrarot-Thermografie sichtbar macht, wird nach Ansicht der Wissenschaftler durch die zunehmende Weitstellung und Reperfusion (die Wiederherstellung des Blutflusses) der kutanen arteriellen **Perforatorgefäße*** verursacht.

** Perforatorgefäße sind Äste von tieferliegenden Blutgefäßen, die die Faszie durchbrechen, um die darüber liegenden Gewebeeschichten wie Haut und Unterhautfettgewebe zu versorgen.*

Neuartige Einblicke in die zeitliche und regionale Wärmeableitung unter Belastung

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Körper bei Belastung die Gefäßreaktion verzögert, um die Wärme erst dann verstärkt abzugeben, wenn die Körperkerntemperatur einen gewissen Schwellenwert überschreitet. In den Belastungstests zeigte sich, dass diese Verzögerung besonders über den aktiven Muskeln (z. B. im Oberschenkel) auftritt, während über den nicht aktiven Körperbereichen (z. B. Unterarm, Brust) schnell eine Temperaturerhöhung zu verzeichnen ist.

Für das Widerstandstraining zeigte die Gruppe um Dr. Hillen erstmals, dass die Thermografie drei verschiedene Wege der Wärmeableitung während dieser Art der Belastung erkennen kann. Die Wärme wird bevorzugt über die Oberfläche größerer Muskelgruppen abgegeben (venöses Strahlungsmuster), über die Oberfläche kleinerer Muskelgruppen (homogenes Strahlungsmuster) oder über die Oberfläche der Perforasomen (Versorgungsbereich der Haut, der durch ein oder mehrere Perforatorgefäße mit Blut versorgt wird).

Den Wissenschaftlern ist es zusätzlich gelungen, durch die Anwendung von tiefen neuronalen Netzen die unterschiedlichen blutgefäßassoziierten Wärmeverteilungsmuster während der Bewegung automatisch zu erfassen, auszuwerten und als Zeitreihendaten analysieren zu können. Dies führt insgesamt zu einer zeiteffizienten, reproduzierbaren und objektiven Messung der relevanten Temperaturen in verschiedenen Hautarealen.

Erkenntnisgewinn durch Thermografie und KI – Ein Fortschritt für Diagnostik und Monitoring

Mit den Versuchen konnten die Mainzer Forscher tiefere Einblicke in die Temperaturregelung des Körpers gewinnen. Die Untersuchungen zeigen, dass sich die Hauttemperatur während des Trainings je nach Belastung und Körperregion unterschiedlich verhält. Besonders interessant sind die Vergleiche zwischen Lauf- und Fahrradergometrie sowie die Analyse typischer Wärmemuster und Temperaturverläufe im Zusammenhang mit kardiovaskulären Parametern. Die Thermografie bietet – insbesondere in Kombination mit algorithmischer Mustererkennung – zudem das Potenzial, die interne und externe Belastung der Probanden zu quantifizieren. Diese Erkenntnisse eröffnen der Sportwissenschaft und Medizin neue Möglichkeiten hinsichtlich Diagnostik und Monitoring.

KI-gestützte Thermografie in der Leistungsphysiologie

Sportmedizinische Leistungsdiagnostik mit der VarioCAM® HD head 880

Literatur:

Andrés López, D., Hillen, B., Nägele, M., Simon, P., & Schömer, E. (2024a). StereoThermoLegs: label propagation with multimodal stereo cameras for automated annotation of posterior legs during running at different velocities. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13343-w>

Andrés López, D., Hillen, B., Nägele, M., Simon, P., & Schömer, E. (2024b). ThermoNet: advanced deep neural network-based thermogram processing pipeline for automatic time series analysis of specific skin areas in moving legs. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(JTACC-V4 2023). <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13625-3>

Hillen, B., Andrés López, D., Marzano-Felisatti, J. M., Sanchez-Jimenez, J. L., Cibrián Ortiz de Anda, R. M., Nägele, M., Salvador-Palmer, M. R., Pérez-Soriano, P., Schömer, E., Simon, P., & Priego-Quesada, J. I. (2023). Acute physiological responses to a pyramidal exercise protocol and the associations with skin temperature variation in different body areas. *Journal of Thermal Biology*, 115, 103605. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2023.103605>

Hillen, B., Andrés López, D., Pfirrmann, D., Neuberger, E. W., Mertinat, K., Nägele, M., Schömer, E., & Simon, P. (2023). An exploratory, intra- and interindividual comparison of the deep neural network automatically measured calf surface radiation temperature during cardiopulmonary running and cycling exercise testing: A preliminary study. *Journal of Thermal Biology*, 113, 103498. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2023.103498>

Hillen, B., Andrés López, D., Schömer, E., Nagele, M., & Simon, P. (2022). Towards Exercise Radiomics: Deep Neural Network-Based Automatic Analysis of Thermal Images Captured During Exercise. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 26(9), 4530–4540. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2022.3186530>

Hillen, B., Pfirrmann, D., Nägele, M., & Simon, P. (2020). Infrared Thermography in Exercise Physiology: The Dawning of Exercise Radiomics. *Sports Medicine*, 50(2), 263–282. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01210-w>