

This is a post-peer-review, pre-copyedit version of an article published in *Manuelle Medizin*.
The final authenticated version is available online at: <http://dx.doi.org/10.1007/s00337-021-00824-4>

Eigenwahrnehmung und Aktive Inferenz

Resultat eines komplexen dynamischen funktionellen Systems

Ausgehend vom Prinzip der freien Energie sowie der aktiven Inferenz beschreibt dieser Beitrag die Gesamtheit der zur räumlichen und bewegungsbezogenen Eigenwahrnehmung sowie zu willkürlichen Bewegungen beitragenden, interagierenden Partialmechanismen als ein dynamisches komplexes funktionelles System. Dieses System befindet sich in einem fortlaufenden Prozess der Selbsterhaltung sowie -bestätigung, der zu einem dynamischen Gleichgewichtszustand führt. Ziel des umschriebenen Systems ist es, ein Modell für die Bewegungsregulation unter Führung multimodaler sensorischer Zuflüsse zu generieren, über welches der Organismus in eine dynamische Wahrnehmungs-Handlungs-Interaktion mit der Umwelt tritt. Funktionsstörungen der räumlichen und bewegungsbezogenen Eigenwahrnehmung sowie der Wahrnehmung der relativen Umwelt können Funktionsstörungen des Bewegungssystem bedingen und auf Verarbeitungs- und Wahrnehmungsstörungen der Sinnessysteme beruhen. Entsprechend liefert das Prinzip der freien Energie und die einhergehende Denkweise Impulse zur Reflexion und Weiterentwicklung von bestehenden manualmedizinischen Praktiken, aber auch zur Innovation.

Schlüsselwörter: Propriozeption, Wahrnehmung, Bewegung, Wahrnehmungsstörungen, psychomotorische Fähigkeiten

Proprioception and Active Inference

Resulting from a Complex Dynamical Functional System

Based on the free energy principle and the active inference framework, this article argues that the myriad of mechanism contributing to spatial and movement-related self-perception – i.e., proprioception in a wider sense – as well as voluntary movement constitute a complex dynamic functional system. This system finds itself in a constant self-evidencing process which leads to a non-equilibrium steady state. It aims at generating a model for action regulation which is primarily based on multimodal sensory input and enables the organism to engage in a perception-action-interaction with its environment. Dysfunctions in spatial and movement-related perception can cause functional disorders of the movement system and may be based on perceptual or processing disorders of the sensory systems. Consequently, the free energy principle and its inherent way of thinking encourage the re-evaluation and further development of established practices and can, moreover, foster innovation in the field of manual medicine.

Keywords: Proprioception, Perception, Movement, Perceptual Disorders, Psychomotor Performance

Vom Muskelsinn über Propriozeption zum Körperschema

Die Wahrnehmung des Bewegungssystems stellt ein interdisziplinäres Forschungsfeld dar, dessen fundamentale anatomische Grundlage auf das Werk *On the nervous circle which connects the voluntary muscles with the brain* (1826) [1] des schottischen Physiologen Charles Bell zurückzuführen ist. Während zunächst vom „Muskelsinn“ gesprochen wurde, schlug 1880 der englische Neurologe Henry Charlton Bastian den Begriff „Kinästhesie“ vor, um den Komplex an sensorischen Empfindungen zu beschreiben, der es ermöglicht, die Position und Bewegung der Gliedmaßen wahrzunehmen sowie verschiedene Widerstände und Gewichte zu unterscheiden [2]. 1906 führte schließlich Sir Charles Scott Sherrington in seiner Klassifizierung der Sinne, den Begriff „Propriozeption“ ein [3]. Bis heute besteht hinsichtlich der Begrifflichkeiten keine Eindeutigkeit und Abgrenzung voneinander, sodass Kinästhesie und Propriozeption weitgehend synonym verwendet werden.

Während Sherringtons Ausführungen noch die Annahme zugrunde lag, dass für Sinneswahrnehmungen ein physiologisches Korrelat in Form von spezifischen Rezeptoren vorhanden sei, hat sich im Laufe des 20. Jahrhunderts zunehmend die Auffassung verbreitet, dass Sinneswahrnehmungen in vielen Fällen auf multimodalem Input beruhen [4]. Folglich werden ein Sinn und das entsprechende Sinnessystem in der Regel begrifflich getrennt behandelt.

Um zu einer differenzierten Terminologie hinsichtlich der Körperwahrnehmung zu gelangen, sollten die Begriffe „propriozeptives System“ und „Propriozeptoren“, die ausschließlich auf einer physiologischen Betrachtungsweise beruhen, von der Propriozeption, welche auch Prozesse auf der psychischen Ebene einschließt, unterschieden werden. Dabei umfasst das propriozeptive System die Kette physikochemischer Ereignisse, die an der Aufnahme und Weiterleitung von sensorischen Informationen aus der Körperperipherie über Bewegung und Position beteiligt sind, während es sich bei der Propriozeption um bewusste wie vorbewusste Wahrnehmungsergebnisse, die die Körperposition und -bewegung im Raum betreffen, handelt. Diese Wahrnehmungsergebnisse stellen mentale Repräsentationen des Körpers dar, die sich auf die momentane Position und Bewegung des Körpers im Raum beziehen. Während frühere Modelle bei Repräsentationen des Körpers zwischen dem Körperbild – einer semantischen sowie wahrnehmungsbezogenen Repräsentation – und dem Körperschema – einer handlungsleitenden Repräsentation – unterschieden, ist eine strikte Trennung dieser beiden heute nicht mehr haltbar. Zudem gibt es Hinweise auf einige weitere kognitive Prozesse, die auf die Verarbeitung somatosensorischer Informationen angewiesen sind. Diese umfassen soziale und affektive als auch gedächtnisbezogene Leistungen [5].

Repräsentationen sind unabhängig von Empfindungen, was sich zum Beispiel darin zeigt, dass Sinnesdaten im Handlungsvollzug verwendet werden können, ohne dass diese von einer bewussten Sinnesempfindung begleitet werden. Entsprechend umfassen Wahrnehmungen neben bewussten auch vorbewusste Inhalte. Repräsentationen enthalten zudem nur ausgewählte Merkmale und sind kein wirkliches Abbild der Umwelt, sondern lediglich hypothetische Konstrukte unseres Gehirns [6]. Die mentalen Repräsentationen tragen zur Ausbildung einer überdauernden phänomenologischen Erfahrung des eigenen Körpers bei, woraus sich ergibt, dass der Körper nicht unmittelbar wahrgenommen wird, sondern die Eigenwahrnehmung sowohl durch sensorischen Input als auch durch vorangegangene Erfahrungen beeinflusst wird [7].

Einen Erklärungsansatz, wie das Gehirn auf Grundlage von Hypothesen zu Wahrnehmungsergebnissen gelangt, bietet das von Karl Friedman postulierte Prinzip der freien Energie, welches im weiteren Verlauf skizziert wird.

Propriozeption im engen und weiten Sinn

Bis heute besteht Uneinigkeit darüber, 1) ob Propriozeption ausschließlich afferente Signale umfasst oder auch deren Verarbeitung auf supraspinaler Ebene, 2) ob Informationen aus dem vestibulären System Teil der Propriozeption sind, 3) inwiefern motorischer/efferenter Output zur Propriozeption beiträgt und 4) ob bewusste und vorbewusste Propriozeption unterschieden werden sollten. Dies hängt auch damit zusammen, dass physiologische Grundlagen und (potentiell bewusste) Wahrnehmung nicht immer klar getrennt werden. Aus diesem Grund kann ein weites und enges Begriffsverständnis hinsichtlich der Propriozeption unterschieden werden.

Im engen Sinn bezieht sich Propriozeption ausschließlich auf die Informationen aus Rezeptoren in der Körperperipherie. Nach diesem Verständnis stellt sie den Teil der allgemein-somatosensiblen Wahrnehmung dar, der sich auf die Sensorik des Bewegungsorgans bezieht und ist somit abzugrenzen von der Sensorik der Körperoberfläche [8, 9]. **Propriozeption im weiten Sinn beruht hingegen auf der Integration multimodaler Inputs aus verschiedenen Sinnessystemen und supraspinalen Instanzen.** So sind bei willkürlichen Bewegungen das sensorische und motorische System interaktiv miteinander verbunden, was im Begriff des sensomotorischen Systems zum Ausdruck kommt. Ebenso können Vorwissen und -erfahrungen zur Eigenwahrnehmung beitragen [10, 11].

Beiden Auffassungen ist gemein, dass zwischen passiver und aktiver Reizaufnahme unterschieden werden sollte, da – wie im Nachfolgenden aufgezeigt wird – der Wahrnehmung aktiver Bewegungen gegenüber der Wahrnehmung des passiven Bewegtwerdens unterschiedlich komplexe, systemische Zusammenschlüsse zugrunde liegen und somit unterschiedliche Qualitäten der Sinnesmodalitäten angesprochen werden. Folglich sollte, äquivalent zur Unterscheidung zwischen taktiler und haptischer Wahrnehmung [12], zwischen Wahrnehmung von selbst initiierten Willkürbewegung und des Bewegtwerdens unterschieden werden. Gibson hat hierfür die Begriffe „obtained“ und „imposed proprioception“ vorgeschlagen [4], die sich jedoch bisher kaum etablieren konnten.

Predictive processing und das Prinzip der freien Energie

Die grundlegende Idee des Prinzips der freien Energie von Karl Friston ist, dass die Existenz eines Systems, wie etwa eine einzelne Zelle bis hin zum komplexen System eines Menschen, durch eine sogenannten Markov-Decke gekennzeichnet ist, die innere Zustände – also des Systems oder der Sache selbst – von äußeren Zuständen abgrenzt. Für das Gehirn stellen nach Friston sensorische und aktive Emissionen – also die erfassbaren Zustände – die Markov-Decke dar, über die das Gehirn auf die verborgenen Ursachen dieser Zustände schließen kann. Entsprechend verfügt das System über ein Modell, um Hypothesen über sich selbst sowie die Umwelt aufzustellen und befindet sich in einem fortlaufenden Prozess der Selbsterhaltung sowie -bestätigung, der zu einem dynamischen Gleichgewichtszustand der internen Zustände des Systems führt. Der Gleichgewichtszustand ist dabei geprägt durch eine minimierte Entropie oder Unsicherheit des Modells über die möglichen Zustände des Systems – sodass die variable freie Energie ebenfalls minimiert wird [13].

Das Hierarchical Predictive Coding nimmt an, dass das Gehirn über ein hierarchisches generatives Modell im Sinne der bayesianischen Inferenz verfügt, um Hypothesen (A-priori-Verteilung) über den aktuellen Zustand zu generieren, die zusammen mit der Evidenz aus sensorischem Input zu Vorhersagen (A-posteriori-Wahrscheinlichkeitsverteilung) über Wahrnehmungsergebnisse führen. Dies ist notwendig, da kein unmittelbarer eins-zu-eins-

Zusammenhang zwischen einem spezifischen sensorischen Input und dem ursächlichen Reiz in der Umwelt besteht.

Die unteren Ebenen der hierarchischen Organisation erfassen schnell-ändernde, detailreiche Regelmäßigkeiten, während die höheren Ebenen überdauernde Regelmäßigkeiten enkodieren. Alle Ebenen sind interaktiv miteinander verknüpft, sodass die unteren Ebenen die höheren bedingen („bottom-up“-Regulation) und vice versa („top-down“-Regulation) [13].

Vorhersagefehler minimieren durch aktive Inferenz

Ein zentrales Element des Prinzips der freien Energie sowie des „predictive processing“ sind Vorhersagefehler. Dabei handelt es sich um die Abweichungen der vorherigen Hypothesen über sensorischen Input vom Wahrnehmungsergebnis auf Grundlage des tatsächlichen Inputs und unter Berücksichtigung möglicher Ungenauigkeiten. Die Vorhersagefehler fließen in künftige Vorhersagen ein, sodass ein iterativer Prozess zur Präzisierung des internen Modells entsteht. Je präziser das Modell ist, desto weniger Vorhersagefehler entstehen, sodass die Entropie des Systems sinkt.

Ein weiterer Weg, um Vorhersagefehler und somit die Entropie des Systems zu minimieren besteht darin, aktiv zu handeln, um den sensorischen Input an das Modell anzupassen. Dies ermöglicht es sensorische Evidenz für oder gegen eine unsichere Hypothese zu generieren und diese somit zu testen. Deshalb wird Handeln im Rahmen des Prinzips der freien Energie auch als aktive Inferenz bezeichnet [13]. Hieraus folgt zudem, dass das System neben dem Modell über die Umwelt auch ein Modell über sich selbst besitzen muss, damit Eigenbewegungen nicht zu Vorhersagefehlern führen. Das Modell muss vorhersagen, wie Handlungen den sensorischen Input verändern würden, um diesen Einfluss bei Vorhersagen über die verborgenen Zustände der Umwelt zu abstrahieren.

In der Theorie der optimalen motorischen Kontrolle wird angenommen, dass ein Controller angestrebte Trajektorien aus externen Koordinaten in Bewegungen der Muskulatur, die in internen Koordinaten spezifiziert werden, überführt, indem er ein Kommando generiert. Die aktive Inferenz ersetzt diese Motorkommandos in Form von Handlungsplänen durch Vorhersagen über den zu erwartenden sensorischen Rückfluss aus dem propriozeptiven System [14].

Sensomotorik als komplexes funktionelles System

Dem weiten Verständnis von Propriozeption als Resultat der Integration multimodaler Inputs liegt eine holistische Betrachtungsweise der „Person als Ganzes“, die eine Vielzahl interagierender Systeme in sich vereint, zugrunde. Diese Vorstellung geht auf die neuropsychologische Theorie funktionaler Systeme von Alexander R. Lurija zurück, die wiederum auf Arbeiten der Physiologen Pjotr K. Anokhin und Nikolai A. Bernstein aufbaut. Die Eignung dieser Theorie für die Manuelle Medizin sowie ihre Bedeutung zur Erklärung von Funktionsstörungen am Bewegungssystem hat die Arbeitsgruppe „Funktionskrankheiten“ in einigen Beiträgen in *Manuelle Medizin* dargelegt [15, 16, 17, 18].

Nach Lurija stellen die Wahrnehmung ebenso wie die Bewegung, Sprache oder Denken höhere psychische Prozesse dar, die in komplexen funktionellen Systemen zusammenwirken und jeweils „als ein vollständiges funktionelles System zu verstehen [sind], an dem sich zahlreiche Komponenten beteiligen. Diese Komponenten gehören unterschiedlichen Ebenen des [...] motorischen und nervösen Apparates an“ [19]. Wesentlich für funktionelle Systeme ist zudem eine dynamische Lokalisation, d.h. sie können nicht unmittelbar einer bestimmten

Hirnregion zugeschrieben werden [19]. Aufgrund der Neuroplastizität sind sie veränderbar und „stets an das Erreichen irgendeines deutlich umschriebenen Anpassungseffektes gebunden“ [20]. Wie bereits beschrieben, zielt dieser Anpassungseffekt nach dem Prinzip der freien Energie auf eine Minimierung variabler freier Energie oder von Vorhersagefehlern ab.

Die Gesamtheit der zur räumlichen und bewegungsbezogenen Eigenwahrnehmung sowie zu willkürlichen Bewegungen beitragenden, interagierenden Partialmechanismen konstituieren ein dynamisches komplexes funktionelles System [21]. Das Ziel dieses Systems ist es, ein Modell für die Bewegungsregulation unter Führung multimodaler sensorischer Zuflüsse zu generieren, über die der Organismus in eine dynamische Wahrnehmungs-Handlungs-Interaktion mit der Umwelt tritt. Ein funktionelles Zusammenspiel und eine Gewichtung der Partialmechanismen sind sowohl für die räumliche und bewegungsbezogene Eigenwahrnehmung als auch für eine effiziente Handlungsregulation essentiell.

Als Grundlage für sensomotorische Leistungen werden mittels Vorhersagen (top-down) und Afferenzsynthese (bottom-up) kontinuierlich bewusste wie vorbewusste Wahrnehmungsergebnisse über den Status des Bewegungssystems sowie der Körperlage, über die relative Position der Kompartimente zueinander und über Bewegung aber auch über die relative Umwelt generiert. In der dynamischen Wahrnehmungs-Handlungs-Interaktion mit der Umwelt erhält das Gehirn Input „über die Ergebnisse der ausgeführten Handlung, wodurch dem Organismus die Möglichkeit gegeben ist, den Erfolgsgrad der von ihm ausgeführten Handlung zu beurteilen.“ [22] Diese Zuflüsse dienen der Erzielung eines Anpassungseffektes, der die Qualität zukünftiger Bewegungs- und Wahrnehmungshandlungen sicherstellt [23].

Über die erfahrungsbasierten Anpassungseffekte ist es dem funktionellen System der Bewegungswahrnehmung und -regulation möglich, Annahmen und Vorhersagen über das zu erwartende Afferenzmuster zu generieren. Da Wahrnehmung ein aktiver und selektiver Prozess ist [21], treten vor allem Abweichungen vom angenommenen Muster in das Bewusstsein und dienen der Korrektur des Bewegungsprogrammes [24]. Aufgrund der zeitlichen Latenz der Verarbeitung dieser Informationen in höheren supraspinalen Instanzen, sind für die unmittelbare Sicherstellung von Stabilität und Balance die (spinalen) Reflexe von großer Bedeutung. Die Verarbeitung der Informationen über die Abweichung vom angenommenen Afferenzmuster auf höheren Ebenen hingegen ist wichtig für den fortlaufenden zielgerichteten Handlungsvollzug und damit einhergehend die dynamische Regulation sowohl der Sinnessysteme als auch der Effektoren.

Funktionsstörungen der Eigenwahrnehmung und funktionelle Reagibilität

Da verschiedene Sinnessysteme zusammenwirken, um sensorische und aktive Emissionen über den Status des Körpers und seine relative Umwelt zu generieren, müssen Informationen aus verschiedenen Sinnessystemen situationsadäquat und handlungsgerichtet integriert werden [25]. Der redundante und teils konkurrierende Input wird entsprechend der erwarteten Verlässlichkeit und handlungsbezogenen Relevanz gewichtet [26, 27]. Für den Fall, dass einer der Partialmechanismen weniger verlässliche Informationen liefert – z. B. das visuelle System in einem abgedunkelten Raum –, können die Informationen aus anderen Subsystemen kompensatorisch wirksam werden, wofür sie – wie Beyer und Niemi in ihrem Beitrag in *Manuelle Medizin* darlegen – eine „funktionelle Reagibilität“ benötigen [18].

Verletzungen oder Überlastung können zu Funktionsstörungen führen [15], die auf einer Wahrnehmungs- und Verarbeitungsstörung innerhalb der verschiedenen Ebenen der Hierarchie des Modells beruhen, welches Wahrnehmungsergebnisse generiert. Etwaige

Störungen haben eine überdauernde Verschiebung innerhalb der Gewichtung des sensorischen Inputs zur Folge, da die Information aus dem betroffenen Subsystem vom Gehirn als weniger verlässlich eingeschätzt wird. Dies kann sich in Störungen der Wahrnehmung oder einer verminderten Bewegungsqualität – gegebenenfalls unter manipulierten sensorischen Bedingungen – äußern [28].

Nach Niemi und Schulz zählen „Störungen der Wahrnehmung, Koordination und Stabilisation sowie die konstitutionelle Hypermobilität“ [15] zu den primären Funktionsstörungen des Bewegungssystems dar, die „eine der Hauptursachen für sekundäre Funktionsstörungen des Bewegungssystems, deren Rezidive und die Chronifizierung von Funktionskrankheiten des Bewegungssystems“ [15] seien. Auch **Funktionsstörungen der räumlichen und bewegungsbezogenen Eigenwahrnehmung sowie der Wahrnehmung der relativen Umwelt, die auf Verarbeitungs- und Wahrnehmungsstörungen innerhalb der Sinnessysteme beruhen können, stellen primäre Funktionsstörungen dar.** Ziel der Rehabilitation beziehungsweise präventiver Maßnahmen sollte zunächst eine Funktionsanalyse der verschiedenen Subsysteme sein, um anschließend die gestörte(n) Funktion(en) aller Partialmechanismen und ihre Verwendung im Handlungsvollzug wiederherzustellen oder zu optimieren. Die zugrunde liegenden peripheren und zentralen Anpassungsmechanismen der zur räumlichen und bewegungsbezogenen Eigenwahrnehmung beitragenden, interagierenden Partialmechanismen sind noch nicht endgültig geklärt. Hier setzen das Prinzip der freien Energie sowie die einhergehende Denkweise an und liefern einen Erklärungsansatz, der auch Impulse zur Reflexion, Erweiterung und Weiterentwicklung von bestehenden manualmedizinischen Praktiken liefert. Eine Kombination aus top-down- und bottom-up-Ansätzen – wie etwa kognitive Verhaltenstherapie, Mentales Training, sensorische Stimulation und sensomotorischem Bewegungstraining – könnte im Rahmen einer multimodalen Komplexbehandlung auf neuroplastische Veränderungen hinwirken [29] und die Körperwahrnehmung sowie koordinierte Handlungsregulation verbessern. Hinsichtlich des optimalen Belastungsumfangs und der genauen Anpassungsmechanismen besteht jedoch noch weiterer Forschungsbedarf.

Für die Praxis

Die Gesamtheit der zur räumlichen und bewegungsbezogenen Eigenwahrnehmung sowie zu willkürlichen Bewegungen beitragenden, interagierenden Partialmechanismen stellen ein funktionelles System dar.

Nach dem Prinzip der freien Energie verfügt dieses System über ein Modell, um Hypothesen über zu erwartende Afferenzmuster zu generieren, die mittels aktiver Inferenz überprüft werden können.

Hierzu müssen Informationen aus verschiedenen Sinnessystemen situationsadäquat und handlungsgerichtet integriert und gewichtet werden.

Verarbeitungs- und Wahrnehmungsstörungen innerhalb der Sinnessysteme können zu Funktionsstörungen am Bewegungssystem führen und sollten bei der gedanklichen Ursachenanalyse gestörter Bewegungsfunktionen berücksichtigt werden.

1. Bell C (1826) On the nervous circle which connects the voluntary muscles with the brain. *Philosophical Transaction of the Royal Society* 116:163-173
2. Bastian HC (1880) *The Brain as an Organ of Mind*. Keagan Paul and Co., London
3. Sherrington CS (1906) *The Integrative Action of the Nervous System*. Yale University Press, New Haven
4. Gibson JJ (1966) *The Senses Considered as Perceptual Systems*. George Allen & Unwin Ltd., London
5. De Haan EHF, Dijkerman HC (2020) Somatosensation in the Brain: A Theoretical Re-evaluation and a New Model. *Trends Cogn Sci* 24:529-541
6. Frings S, Müller F (2014) *Biologie der Sinne - Vom Molekül zur Wahrnehmung*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg
7. Riva G (2018) The neuroscience of body memory: From the self through the space to the others. *Cortex* 104:241-260
8. Locher H, Boehni U, Habring M et al. (2013) Rezeptive Felder und Neuroplastizität. *Manuelle Medizin* 51:194-202
9. Trepel M (2017) *Neuroanatomie*. Urban & Fischer Verlag, München
10. Medina J, Coslett HB (2016) Understanding body representations. *Cogn Neuropsychol* 33:1-4
11. Schönhammer R (2013) *Einführung in die Wahrnehmungspsychologie - Sinne, Körper, Bewegung*. facultas.wuv Universitätsverlag, Wien
12. Grunwald M, Beyer L (Hrsg.) (2001) *Der bewegte Sinn - Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung*. Birkhäuser Verlag, Basel,
13. Hohwy J (2013) *The Predictive Mind*. Oxford University Press, New York
14. Hipólito I, Baltieri M, Friston K et al. (2021) Embodied skillful performance: where the action is. *Synthese*
15. Niemier K, Schulz J (2019) Erfassung und Bewertung von Funktionsstörungen des Bewegungssystems. *Manuelle Medizin* 57:441–446
16. Beyer L (2018) Funktionsstörungen am Bewegungssystem. Teil 2: Das funktionelle System – ein Modell für die manuelle Medizin? *Manuelle Medizin* 56:421-428
17. Beyer L, Lieftring V, Niemier K et al. (2019) Funktionsstörungen im Bewegungssystem – ihre Bedeutung in Prävention, Kuration und Rehabilitation. *Manuelle Medizin*
18. Beyer L, Niemier K (2018) Funktionsstörungen am Bewegungssystem – Funktionelle Reagibilität als Grundlage eines optimalen Bewegungsergebnisses. *Manuelle Medizin* 56:293-299
19. Tesak J (2001) Die Aphasielehre des A. R. Lurija (1902 – 1977). *Sprache Stimme Gehör* 25:142-147
20. Anokhin PK (1978) *Beiträge zur allgemeinen Theorie des funktionellen Systems*. Gustav Fischer Verlag, Jena
21. Lurija AR (1973) *The Working Brain – An Introduction to Neuropsychology*. Penguin Books, London
22. Anokhin PK (1967) *Das funktionelle System als Grundlage der physiologischen Architektur des Verhaltensaktes*. Gustav Fischer Verlag, Jena
23. Anderson ML (2017) Of Bayes and Bullets. In: Metzinger TK, Wiese W (Hrsg.) *Philosophy and Predictive Processing*. MIND Group, Frankfurt am Main
24. Cullen KE, Zobeiri OA (2021) Proprioception and the predictive sensing of active self-motion. *Current Opinion in Physiology* 20:29-38

25. Nashner L, Berthoz A (1978) Visual contribution to rapid motor responses during postural control. Brain Res 150:403-407
26. Rohe T, Noppeney U (2016) Distinct Computational Principles Govern Multisensory Integration in Primary Sensory and Association Cortices. Curr Biol 26:509-514
27. Helbig HB, Ernst MO, Ricciardi E et al. (2012) The neural mechanisms of reliability weighted integration of shape information from vision and touch. Neuroimage 60:1063-1072
28. Wohl TR, Criss CR, Grooms DR (2021) Visual Perturbation to Enhance Return to Sport Rehabilitation after Anterior Cruciate Ligament Injury: A Clinical Commentary. Int J Sports Phys Ther 16:552-564
29. Brumagne S, Diers M, Danneels L et al. (2019) Neuroplasticity of Sensorimotor Control in Low Back Pain. J Orthop Sports Phys Ther 49:402-414

Alexander Pleger
Oststr. 24
48329 Havixbeck
Tel. 0178-1901293
E-Mail: alexanderpleger@gmail.com



Interessenkonflikt: Der Autor gibt an, dass keine Interessenkonflikte bestehen.