

# “Funktionelle Neuroanatomie der Motorik”



PD Dr. habil.med. vet. Jenny Hagen

Wissenschaftlerin, Tierärztin, Fachtierärztin für Anatomie, Histologie und Embryologie

Praxis für Orthopädie und Rehabilitation Pferd



# Beeinflussung der Bewegung (?)

Das Pferd soll plan  
füßen.

Das Tier soll neue  
Bewegungsabläufe  
schnell lernen.

Das Pferd soll sensibel  
auf Hilfen reagieren.

Das Pferd soll aus der  
Schulter gehen.

Das Tier soll die  
Gliedermaßen gerade nach  
vorne führen.

Das Tier soll sich  
symmetrisch bewegen.

Das Tier soll nicht  
stolpern.

Das Pferd soll ein  
ausdrucksstarkes  
Bewegungsmuster zeigen.



# Beeinflussung der Bewegung (?)

*“Prof. Annunciato, kann man das Bewegungsmuster eines Individuums beeinflussen?”*

*“Das Bewegungsmuster eines gesunden Individuum?”*

*“Ja, nicht bei einer Krankheit.”*

*“Warum sollte man das tun??? Das wäre unphysiologisch...”*

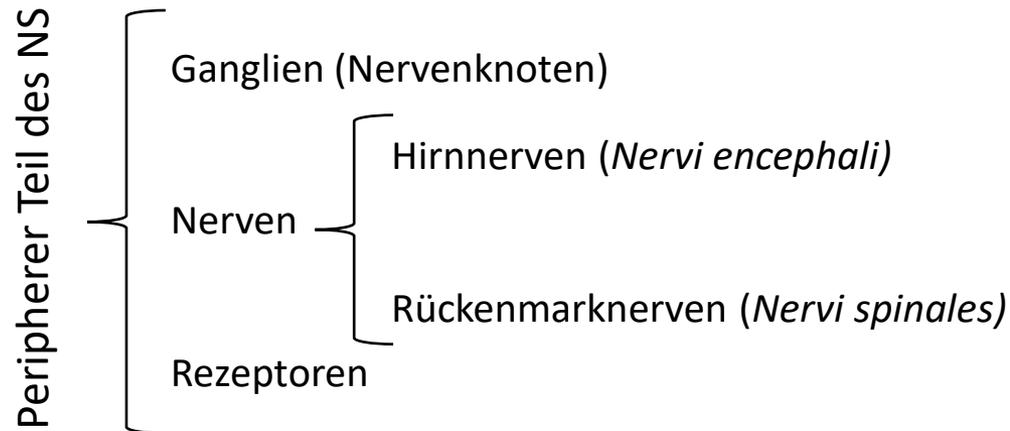
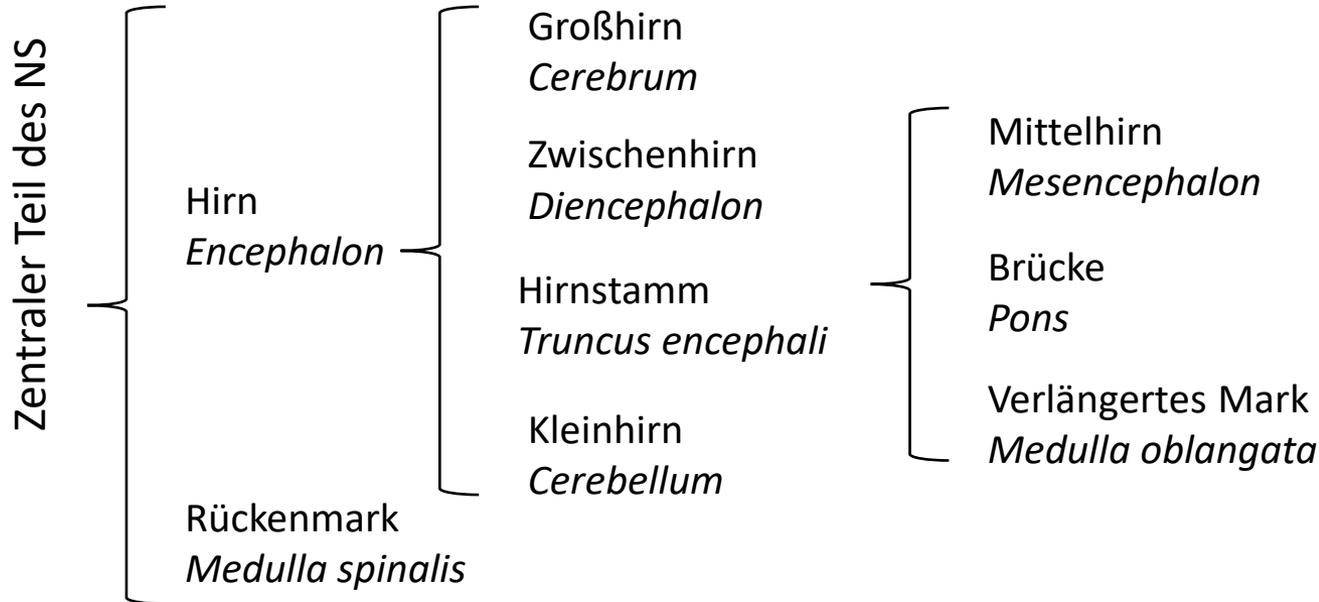


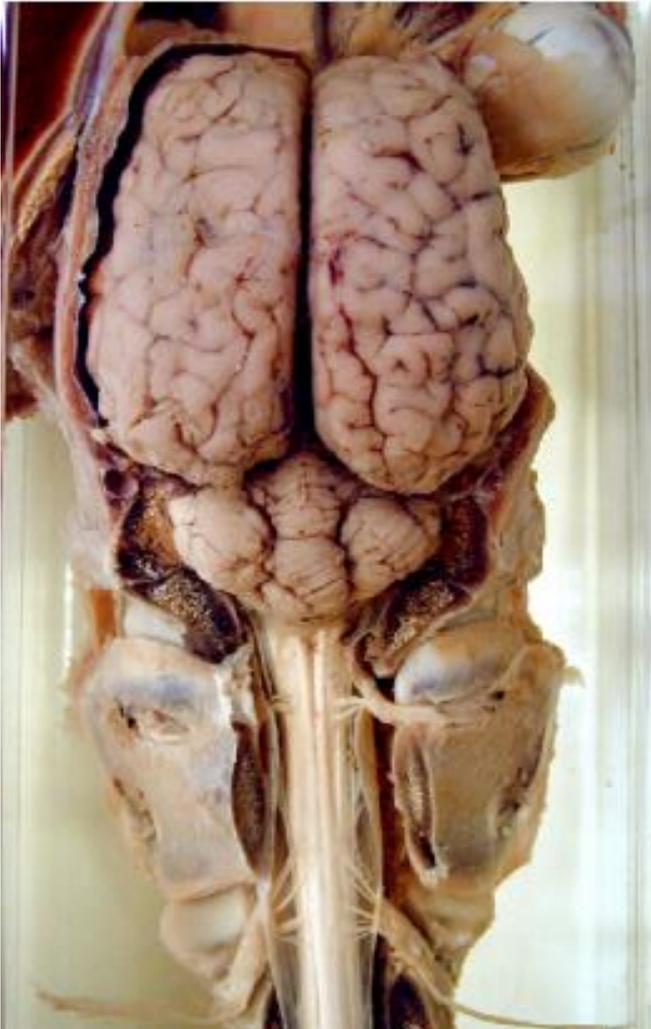
**“Das Nervensystem ist ein Ganzes,  
unteilbar und wird nur aus didaktischen  
Gründen zerlegt.”**

**Prof. Dr. Eros Abrantes Erhard**



# Einteilung des Nervensystems





Teil des zentralen Nervensystems mit grauer Substanz (Nervenzellkörper) und weißer Substanz (Axone)



## Vorderhirn

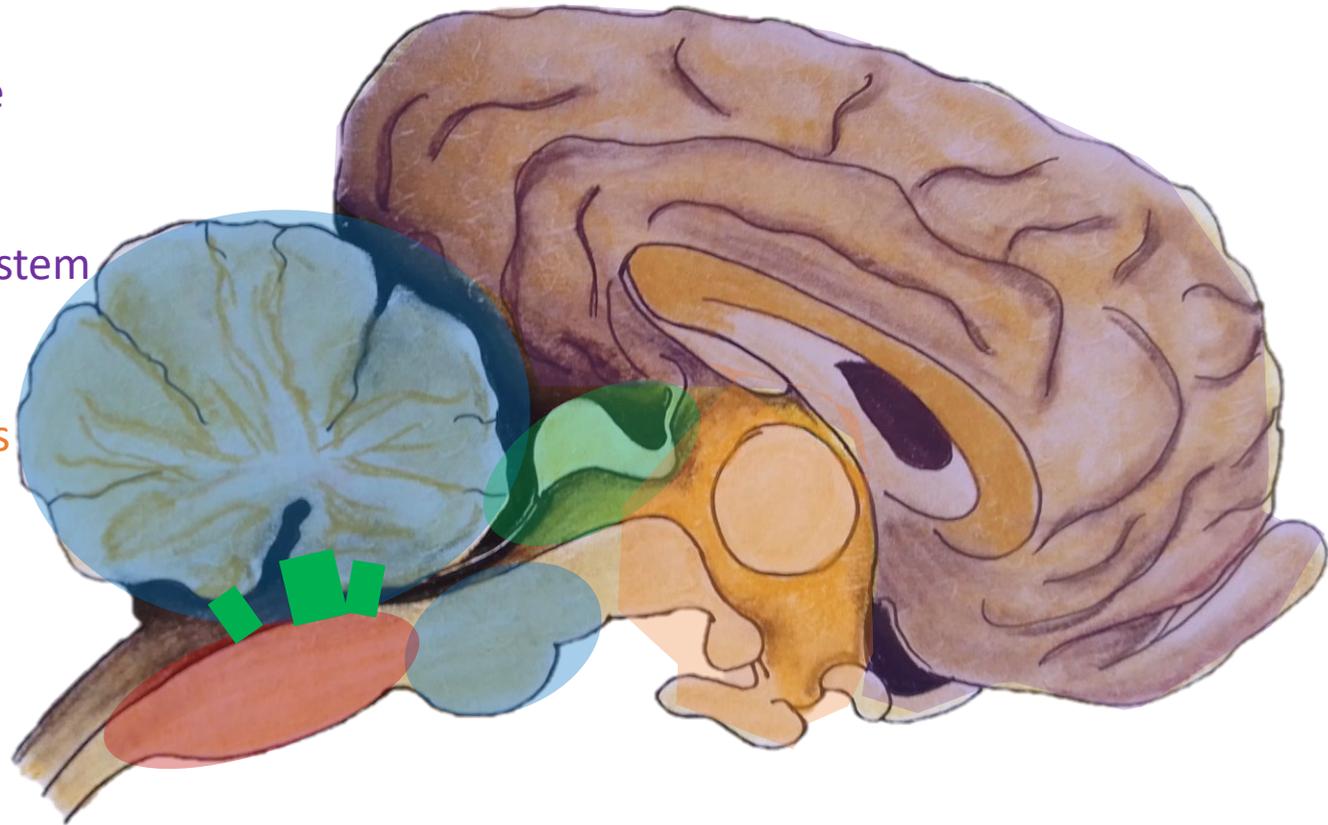
- Endhirn
  - Großhirnrinde (Kortex)
  - Kerne
  - Limbisches System
- Zwischenhirn
  - Thalamus
  - Hypothalamus

## Mittelhirn

- Kleinhirnstiele
- Vierhügelplatte

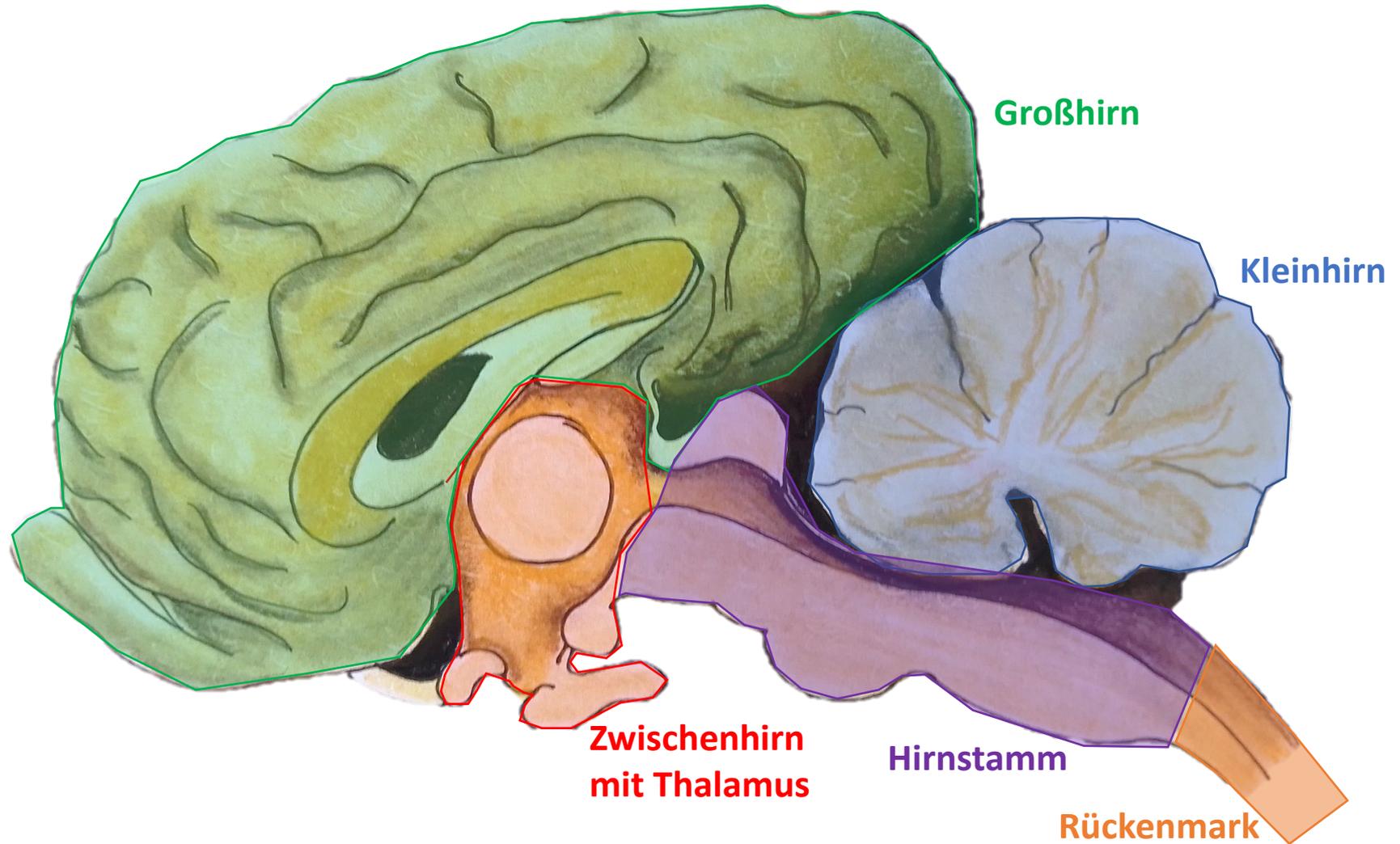
## Rautenhirn

- Hinterhirn
  - Kleinhirn
  - Pons
- Nachhirn
  - Medulla oblongata





# ZNS - Gehirn





# ZNS - Gehirn

Riechlappen

Frontallappen

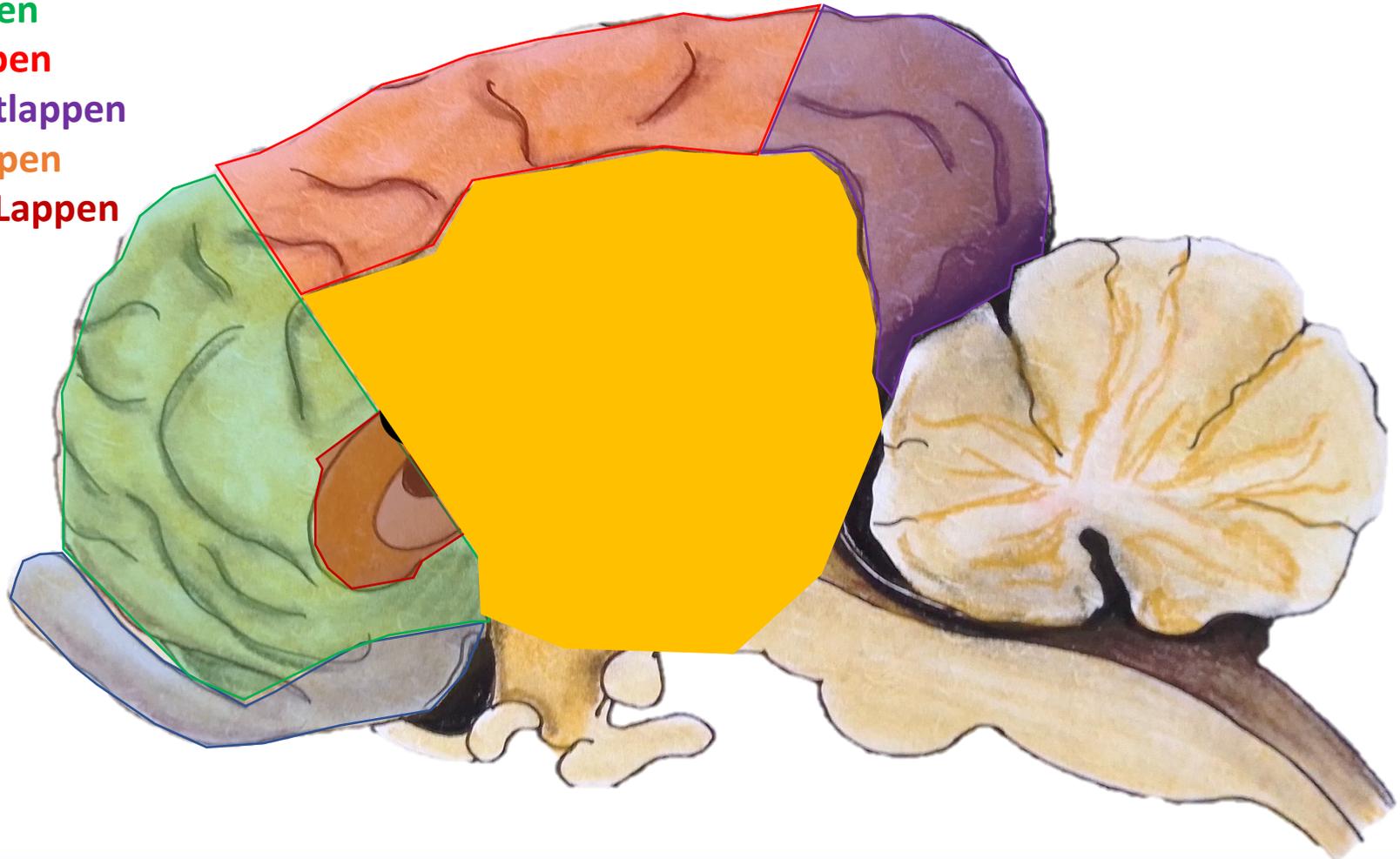
Scheitellappen

Hinterhauptlappen

Schläfenlappen

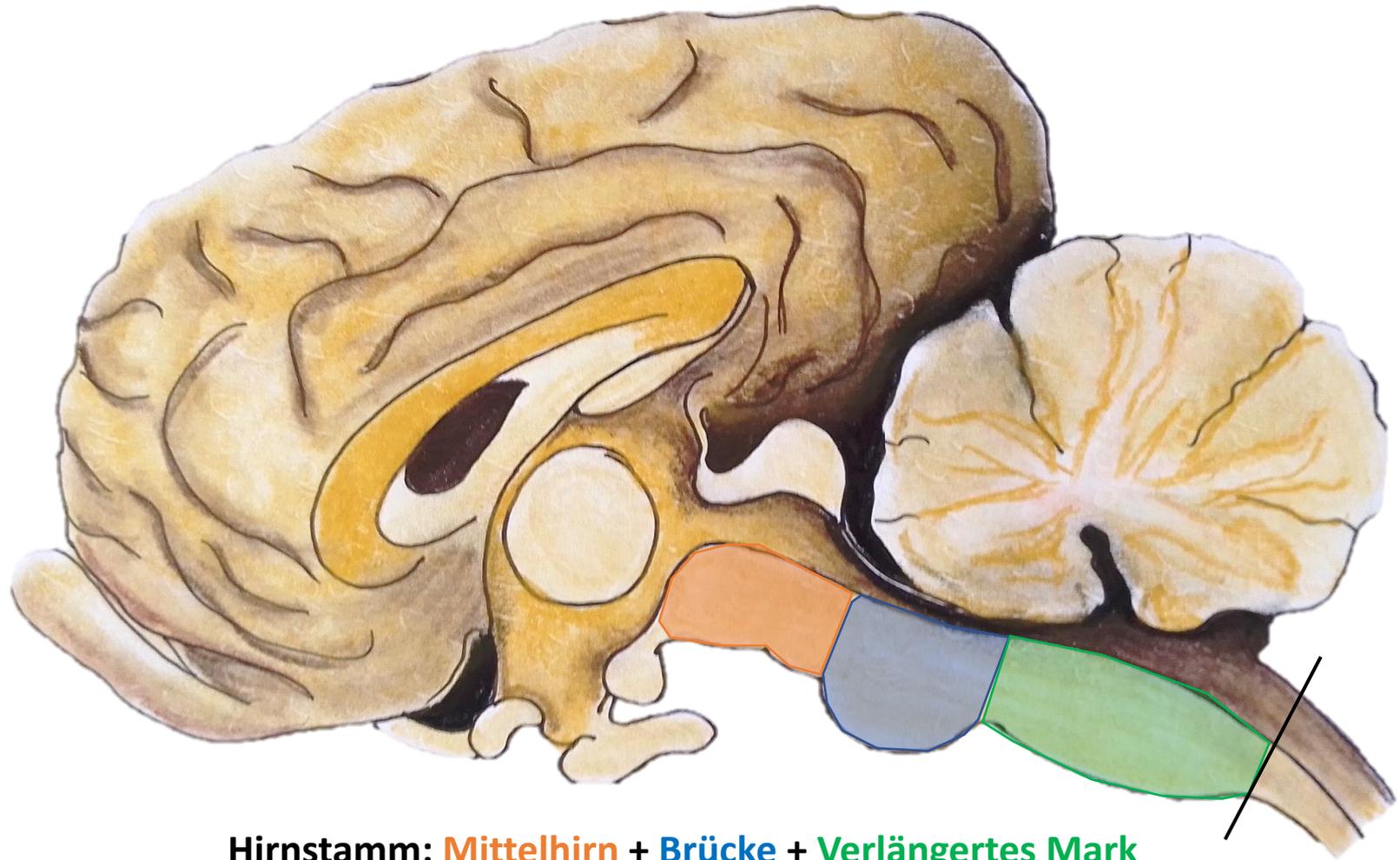
Limbischer Lappen

Insellappen





# ZNS - Hirnstamm



Hirnstamm: **Mittelhirn** + **Brücke** + **Verlängertes Mark**

Foramen magnum



**Rechts = reaktive Gehirnhälfte**

**Links = proaktive Gehirnhälfte**

## LATERALISIERUNG

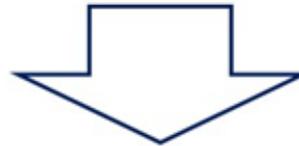
### Rechte Gehirnhälfte

- Rückzugsverhalten
- Reaktives Verhalten
- Kontrolle neuer Situationen
- Globale Aufmerksamkeit
- Verhaltens- und physiologische Stressantworten



### Linke Gehirnhälfte

- Annäherungsverhalten
- Proaktives Verhalten
- Kontrolle von Routinesituationen
- Fokussierte Aufmerksamkeit
- Lernverhalten



### Sensorische Lateralität

~ weist auf Spezialisierung der Gehirnhälften für die Wahrnehmung hin

### Motorische Lateralität

~ weist auf die Tendenz hin, Informationen eher in der rechten oder linken Gehirnhälfte zu verarbeiten

**linken Sinnesorgane sind mit rechten Gehirnhälfte verbunden → in unbekanntem Situationen aktiver → Objekt als ungefährlich eingestuft → Verwendung der rechten Sinnesorgane**



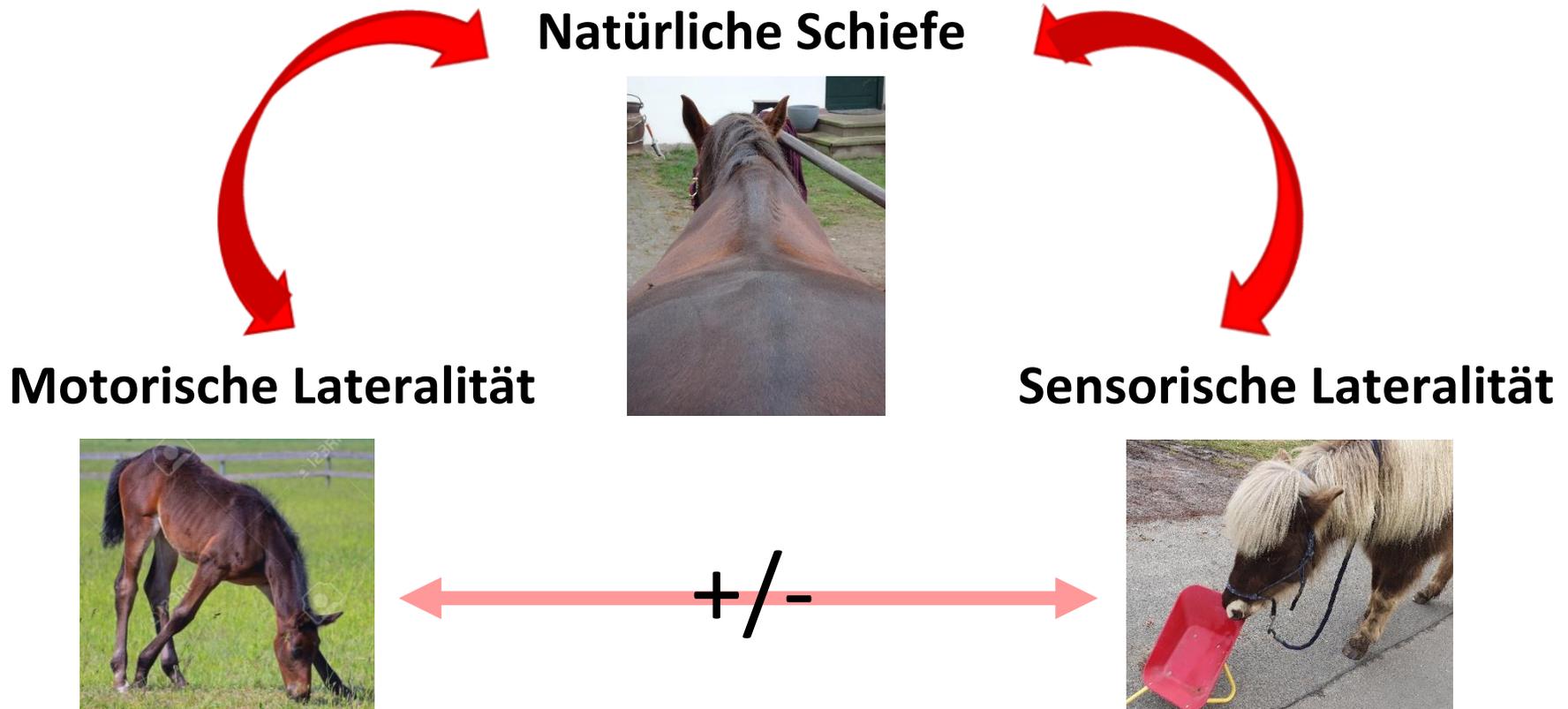
# Lateralität im Gehirn

- **Lateralität = evolutionärer Vorteil**
- fundamental und charakteristisch bei Wirbeltieren
- Ursprung = **Lateralität des Nervensystems**
  - 2 Gehirnhälften die unterschiedliche Aufgaben bewältigen = effizienter
  - Kurzzeit-Gedächtnis = rechte Gehirnhälfte (neue Informationen)
  - Langzeit-Gedächtnis = linke Hälfte (gespeicherte/bekannte Informationen)
- **Stärke und Richtung der Lateralität** durch Umwelteinflüsse während der Entwicklung des Embryos und während der Reifung des Jungtieres bestimmt
- motorischen Lateralität bei wildlebenden Pferden: rechtsseitige = linksseitige Tiere



# Lateralität im Gehirn

- natürliche Schiefe, die sensorische und die motorische Lateralität eigenständige Faktoren
- nicht ausgeschlossen, dass sich die 3 Faktoren beeinflussen
  - motorische Lateralität und natürliche Schiefe





# Motorische Lateralität

= bevorzugte Verwendung der rechten oder linken Vordergliedmaßen  
- am ehesten vergleichbar mit der Händigkeit beim Menschen

**Test:** Weideschrittpräferenz



Untersuchung mit  
alle 30 s für 10 min  
(20 x) an 3 Tagen

Startbeinpräferenz



Untersuchung mit 5  
Wiederholungen an 3 Tagen (15 x)



# Motorische Lateralität

- **keine Präferenz** in der motorischen Lateralität in einer **Population**
- **Präferenzen** für die linke oder rechte Seite auf **individueller Ebene**
- Unterschiede zwischen den **Rassen**
  - Vollblüter linke Weideschrittpräferenz
  - Quarter Horses keine Präferenz
- motorischen Lateralität nimmt mit dem **Alter** zu





# Motorische Lateralität

- Zusammenhang zwischen **motorischer Lateralität und Emotionen**
- durch Informationsverarbeitung und Erfahrungen kognitive Verzerrung
  - Optimisten vs. Pessimisten
  - positiven bzw. negativen Emotionen unterliegen Lateralisierung der Gehirnhälften
- **rechte Startbeinpräferenz** (rechte motorische Lateralität) = **Optimisten**
- **linke Startbeinpräferenz** (linke motorische Lateralität) = **Pessimisten**
- Zunahme der **linksseitigen** sensorischen und motorischen **Lateralität bei Stress**
- **Ausnahmen bestätigen die Regel**





# Sensorische Lateralität

= ungleiche Verwendung der rechten und linken Sinnesorgane wie Augen, Ohren und Nüstern zur Erkundung unbekannter Objekte

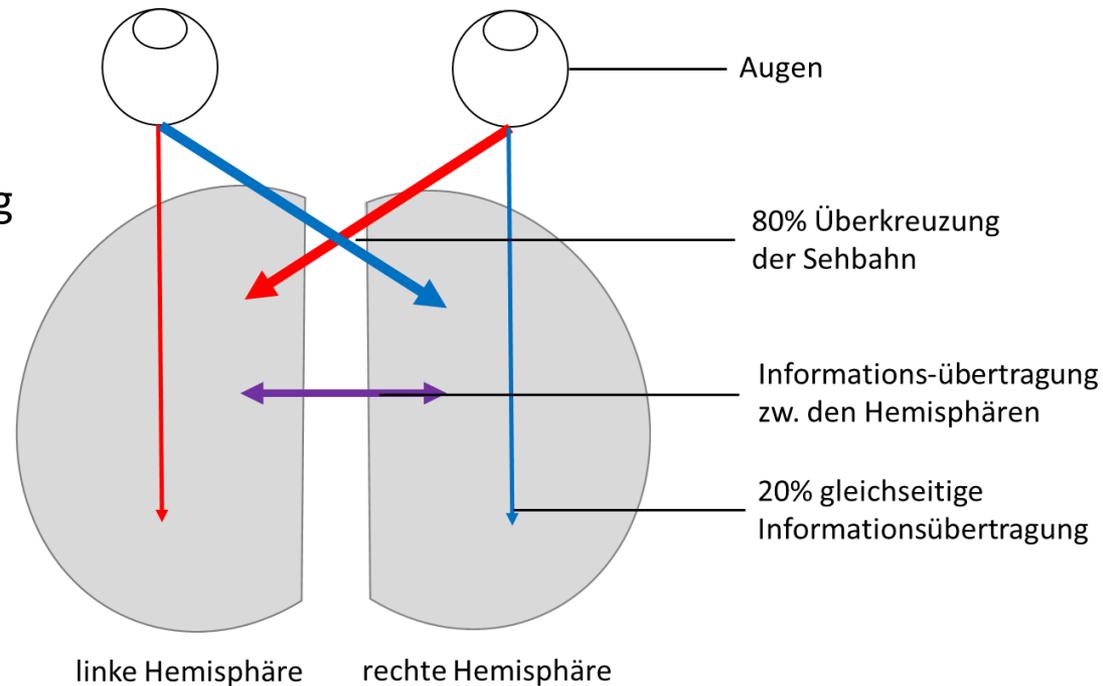


Untersuchung mit 5  
Wiederholungen an 3 Tagen (15 x)



## Visuelle Informationsübertragung beim Pferd

- **80% der Informationen kreuzen Gehirnhälfte**
- **linke Gliedmaßen, Augen und Ohren** stehen primär mit der **rechten Gehirnhälfte** in Verbindung und anders herum
- neutrales Objekt → Verwendung der linken Sinnesorgane → Objekt eher unbekannt und tendenziell beängstigend
- **motorischen Lateralität** gibt einen Hinweis darauf, ob das Pferd dazu tendiert **Informationen in der rechten oder linken Gehirnhälfte** zu verarbeiten





# Sensorische Lateralität

- 48 von 55 Pferden zeigen **Linkspräferenz**, 5 Pferde Rechtspräferenz, 1 Pferd keine Präferenz und 1 Pferd wechselte seine Präferenz
  - Pferde sind beim Longieren auf der linken Hand williger als auf der rechten Hand
  - agonistischen Auseinandersetzungen mit Artgenossen zu 68% linksseitig
  - affiliativen Verhaltensweisen zu 90% über linksseitige Sinnesorgane
  - Zuwendung zu Menschen auch eher über linke Seite



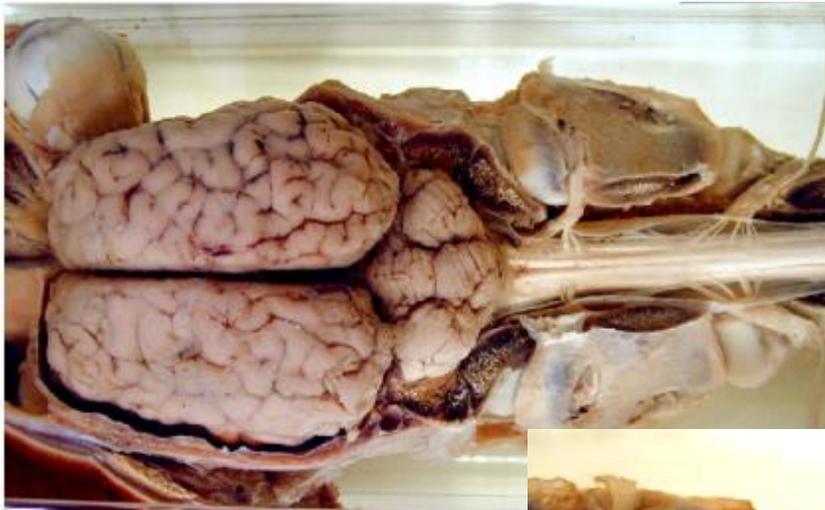


- **Zusammenhang zw. Emotionalität und sensorischer Lateralität**
  - präferierte Verwendung der linken Sinnesorgane = höhere Reaktivität (Flucht)
  - präferierte Verwendung der rechten Sinnesorgane = stärkere Proaktivität (Erkundung/Neugierde)





# ZNS - Rückenmark



Verlängertes Rückenmark



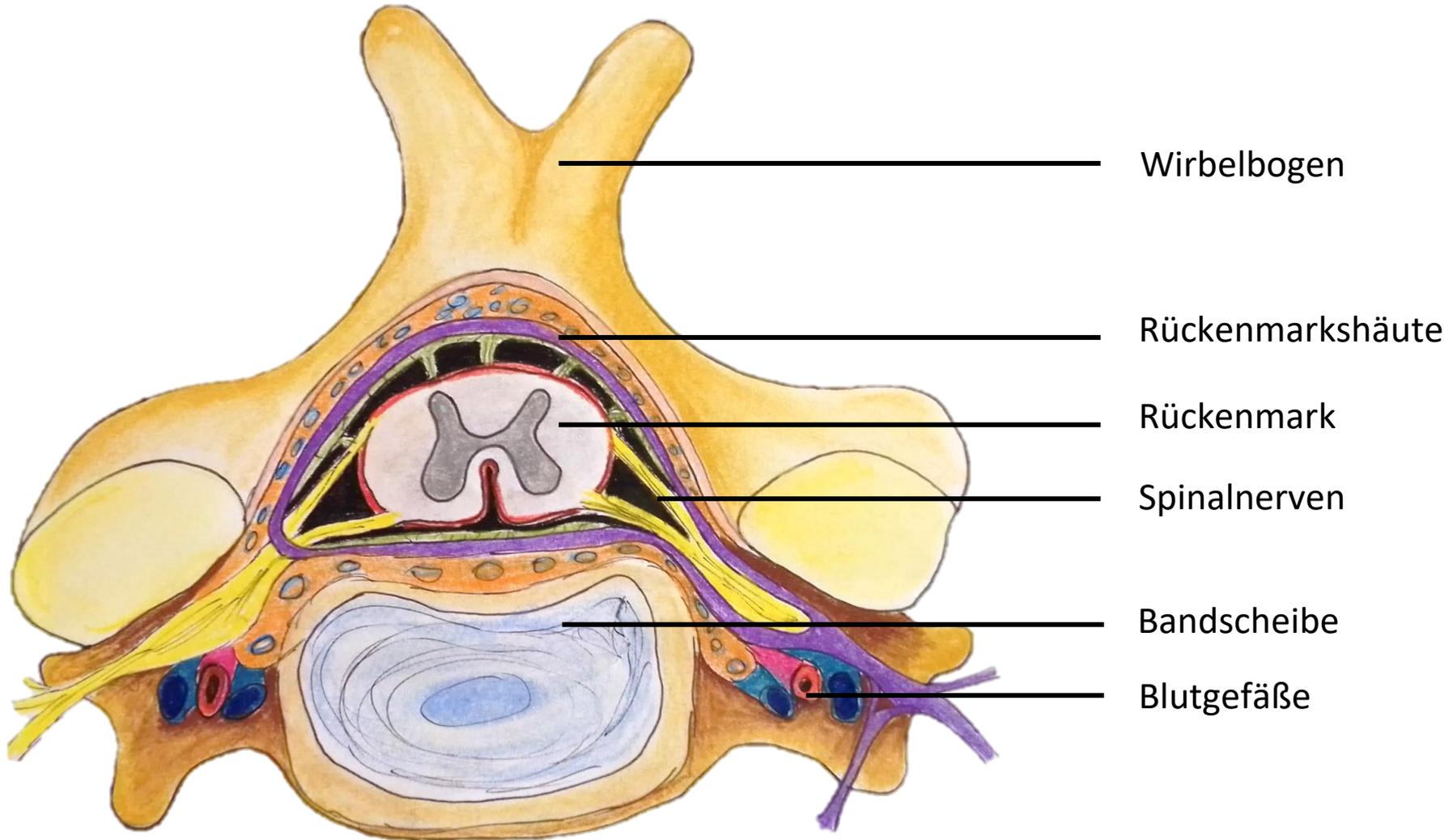
Cauda equina



Ursprung Plexus brachialis



# ZNS - Rückenmark

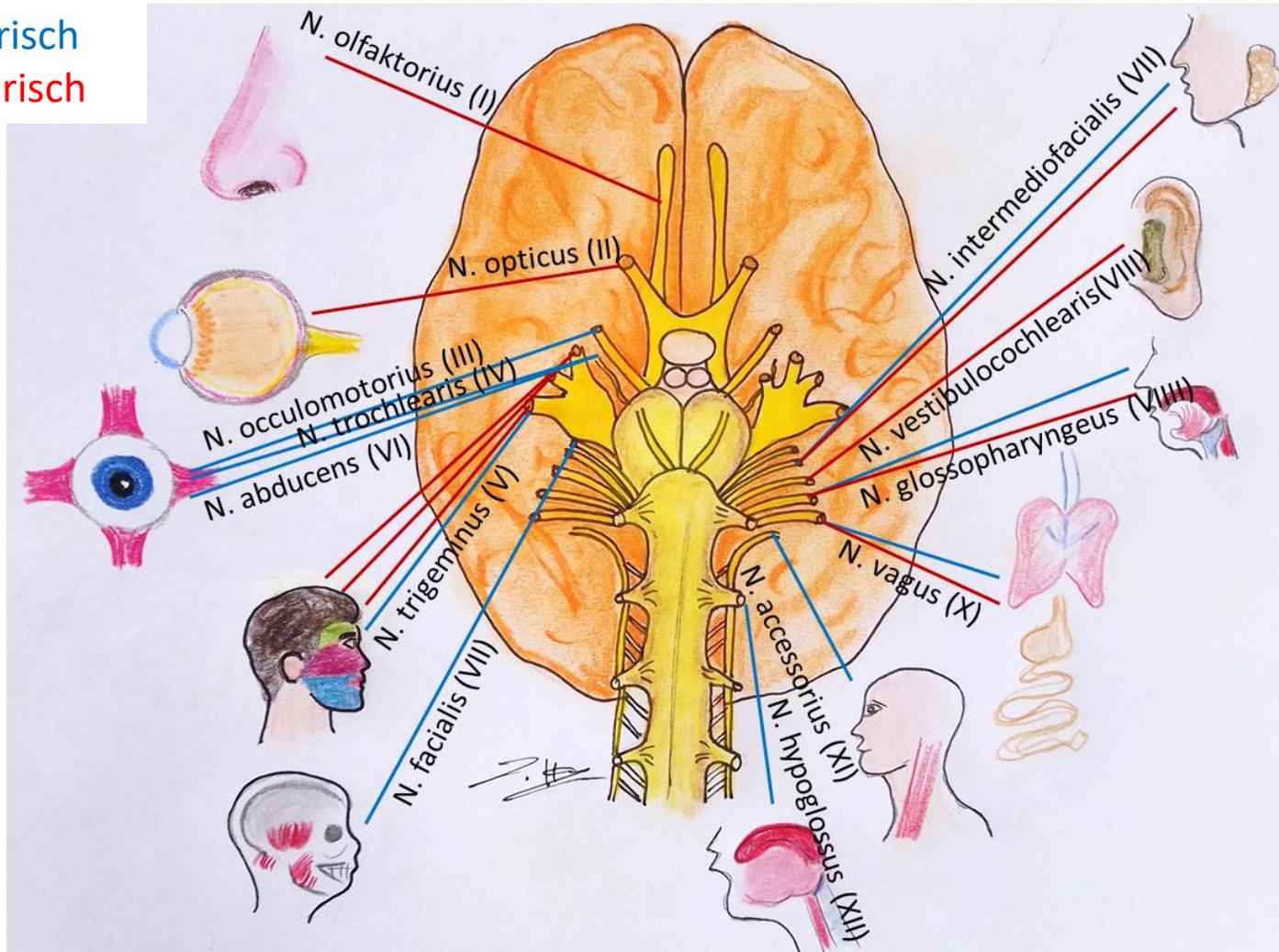




# PNS - Hirnnerven



motorisch  
sensorisch





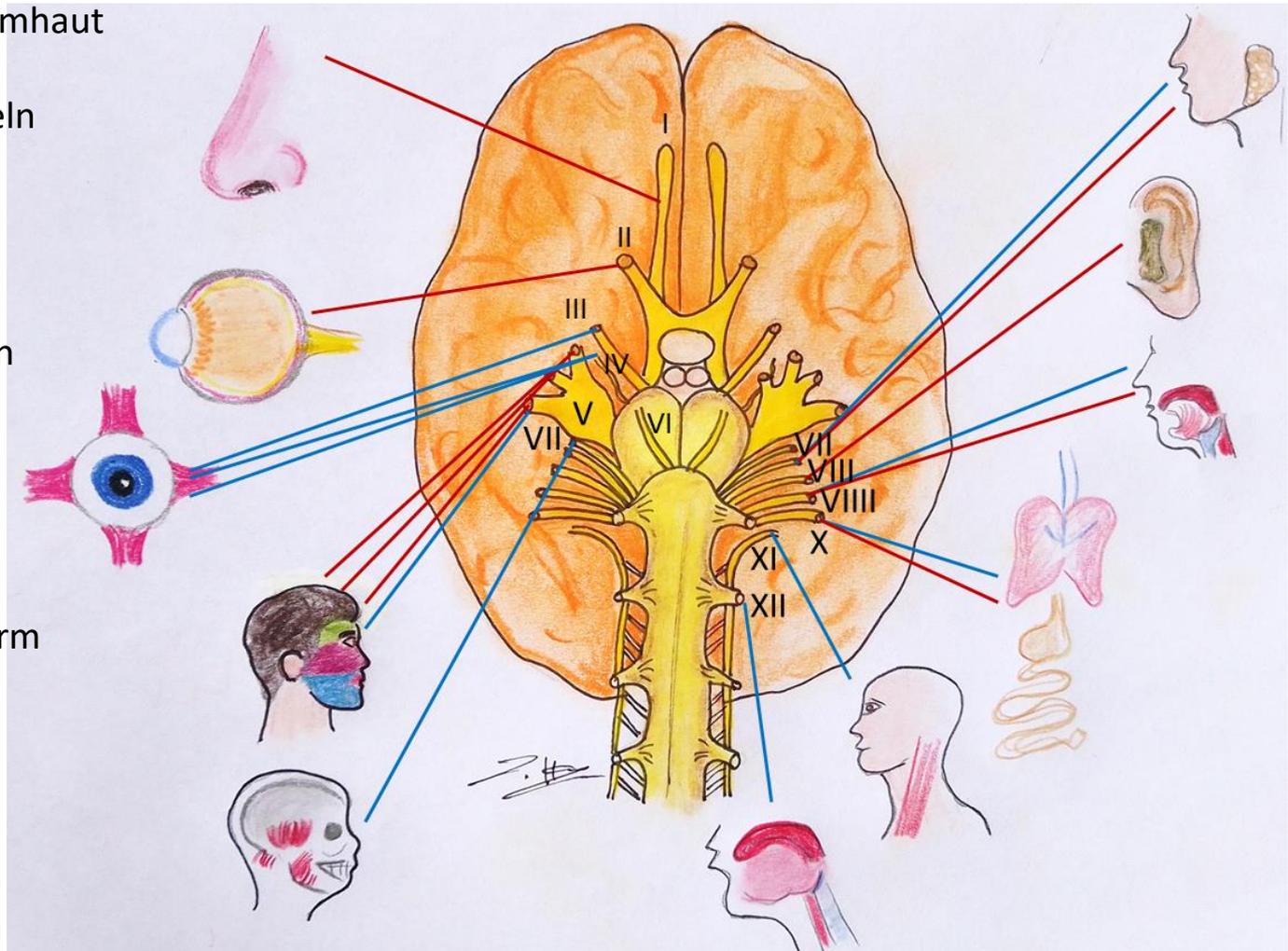
# PNS - Hirnnerven

EcAcademy

Fortbildung

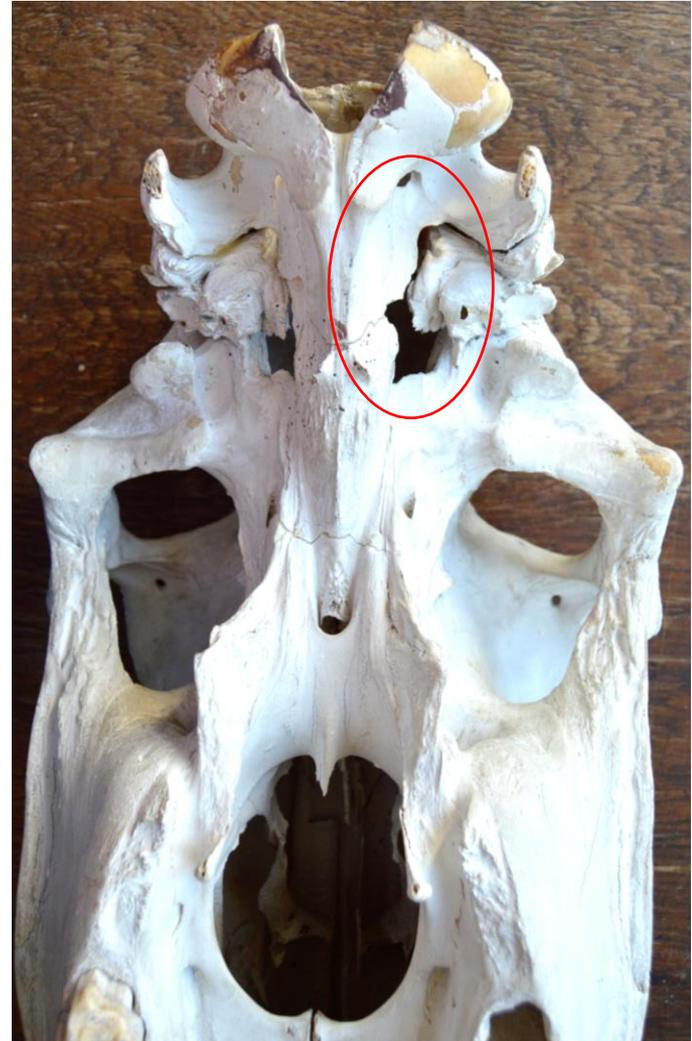
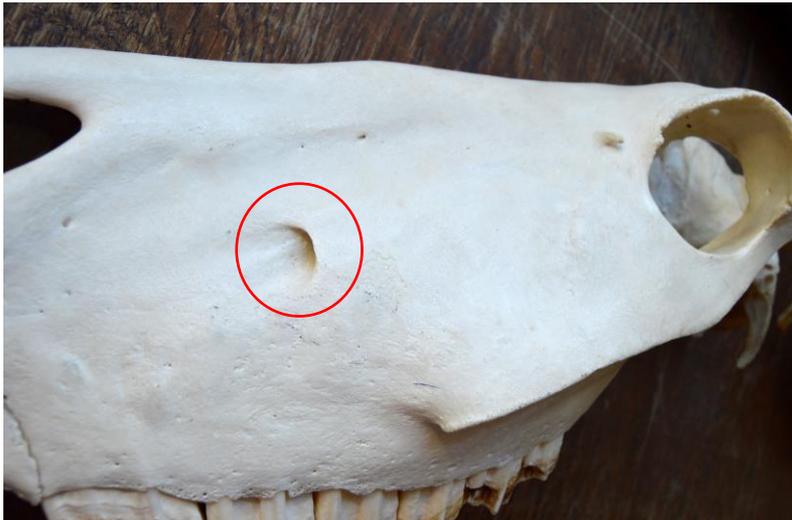


- (I) Riechen/Nasenschleimhaut
- (II) Sehen
- (III), (IV), (VI) Augenmuskeln
- (V) Sensorik des Kopfes
- (VII) Motorik des Kopfes  
+ Speicheldrüsen,  
+ Geschmack
- (VIII) Gleichgewicht, Hören
- (VIII) Pharynxmuskeln,  
+ Geschmack
- (X) Motorik und Sensorik  
für Herz, Lunge,  
Kehlkopf,  
Bronchien, Magen, Darm
- (XI) Halsmuskulatur
- (XII) Zungenmuskulatur



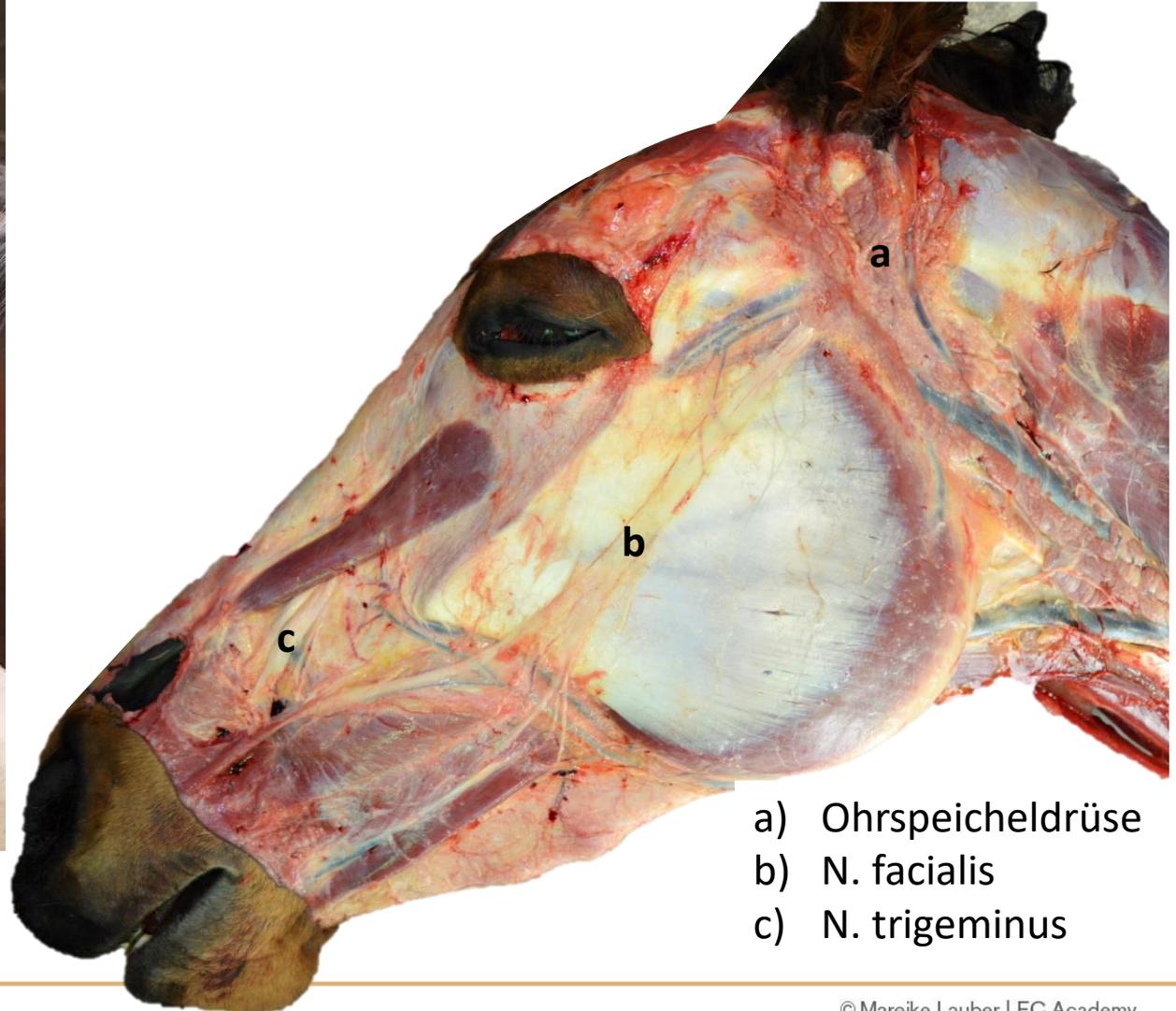


# PNS - Hirnnerven





# PNS - Hirnnerven



- a) Ohrspeicheldrüse
- b) N. facialis
- c) N. trigeminus



# N. facialis



- a) Ramus zygomaticus  
(Jochbeinast)
- b) Ramus buccalis  
dorsalis
- c) Ramus buccalis  
ventralis

= **DER motorische Nerv  
des Kopfes** →  
Innervation der  
mimischen Muskulatur



# N. trigeminus

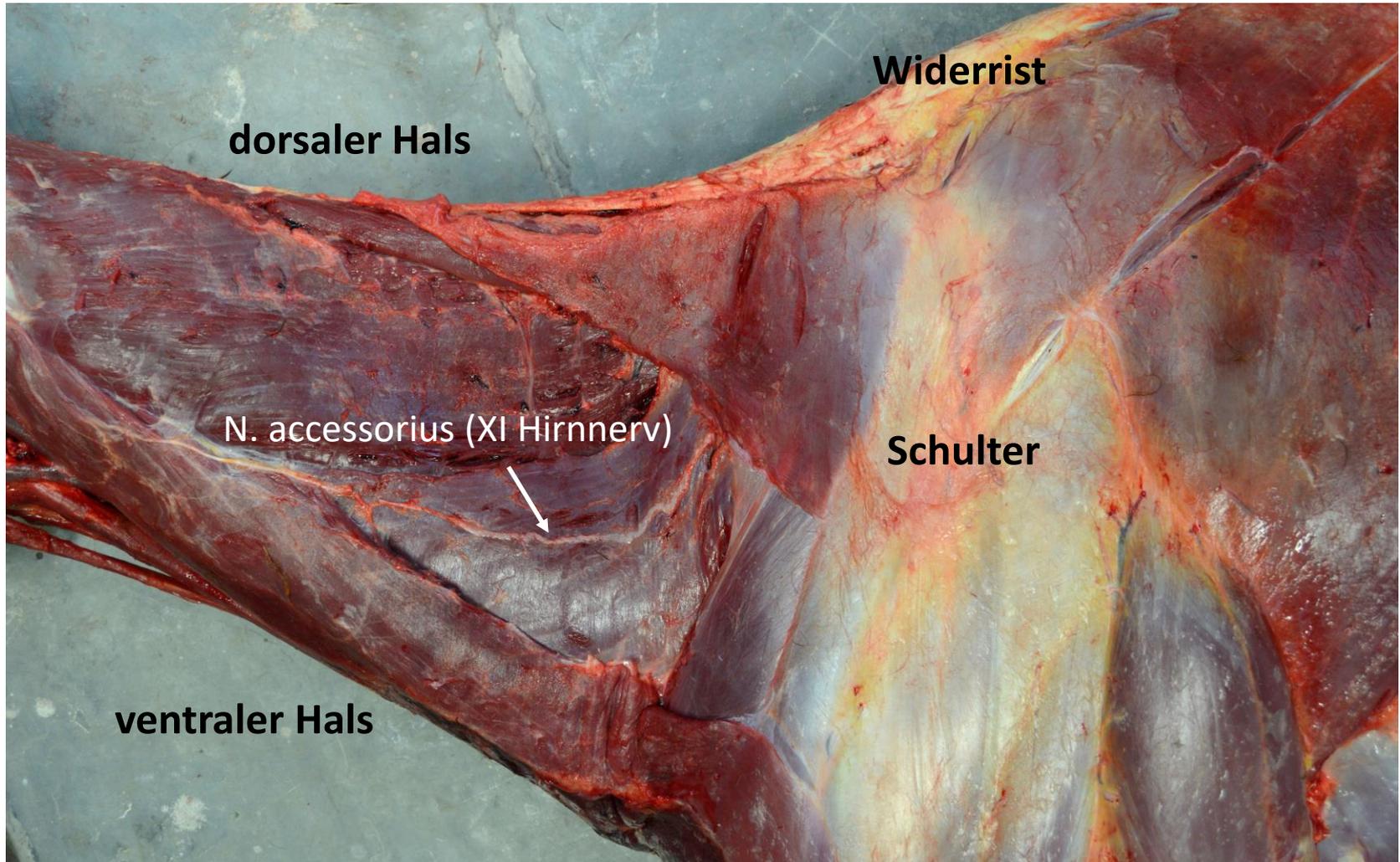


N. trigeminus (a)  
Austritt aus Foramen  
infraorbitale im Oberkiefer (↑)  
**DER sensible Nerv des Kopfes** –  
sensible innervation der  
Maulhöhle, Nase, Zähne





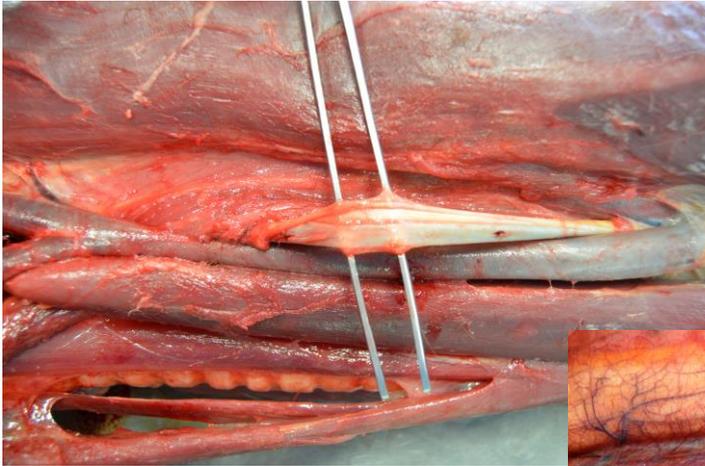
# PNS - Hirnnerven





# PNS - Hirnnerven

**Parasympathikus** = Ruhe, Verdauen, weiten der Blutgefäße und verengen Bronchien  
→ N. vagus (X Hirnnerv), Plexus pelvinus aus dem Sakralmark des Rückenmarks

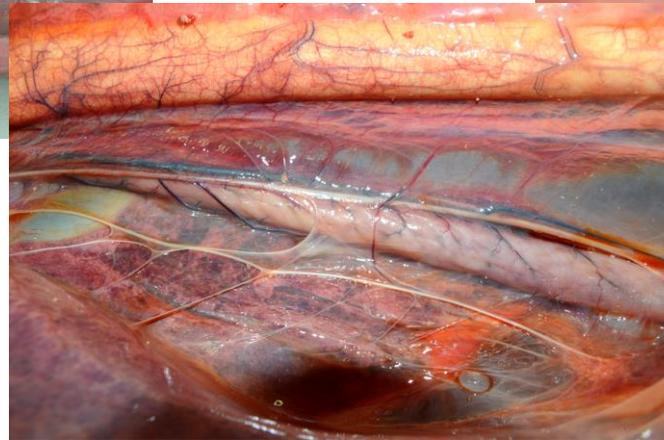


Truncus vagosympathicus  
(Hals)



Grenzstrang  
(Brustwirbelsäule)

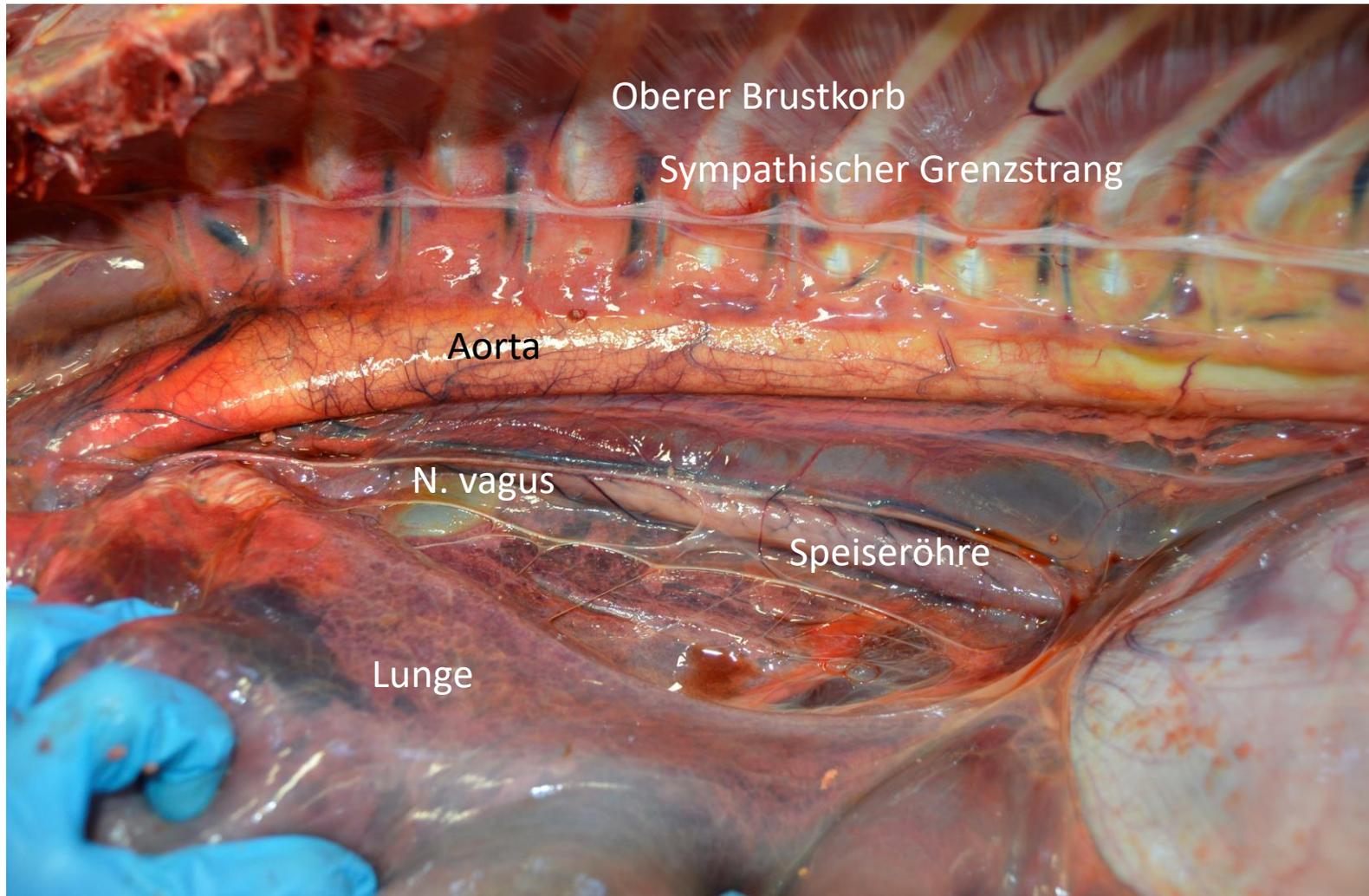
N. Vagus  
(Brustraum)



**Sympathicus** = Flucht, Verengen der Blutgefäße und weiten der Bronchien  
→ Truncus sympathicus aus den thorakolumbalen Rückenmarkssegmenten

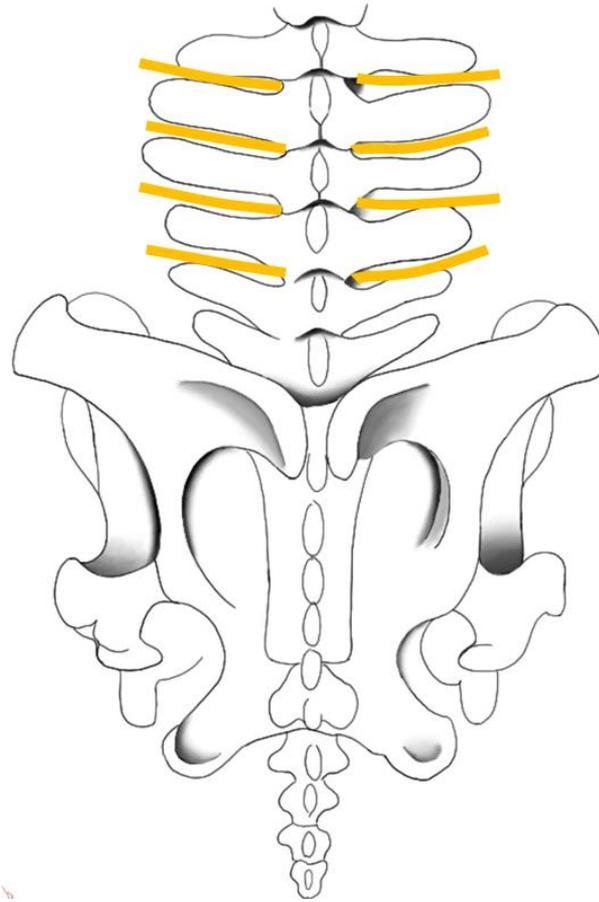
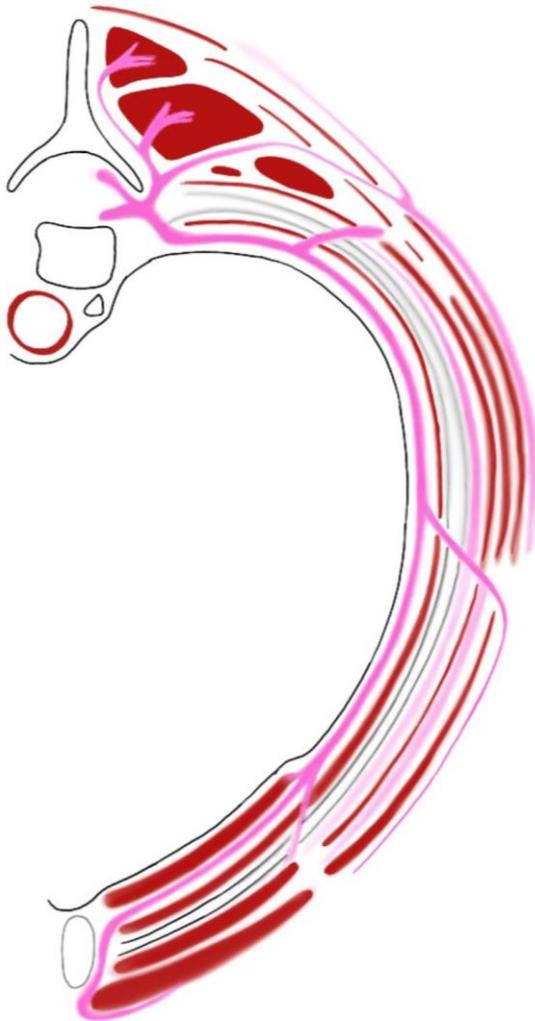


# PNS - Hirnnerven





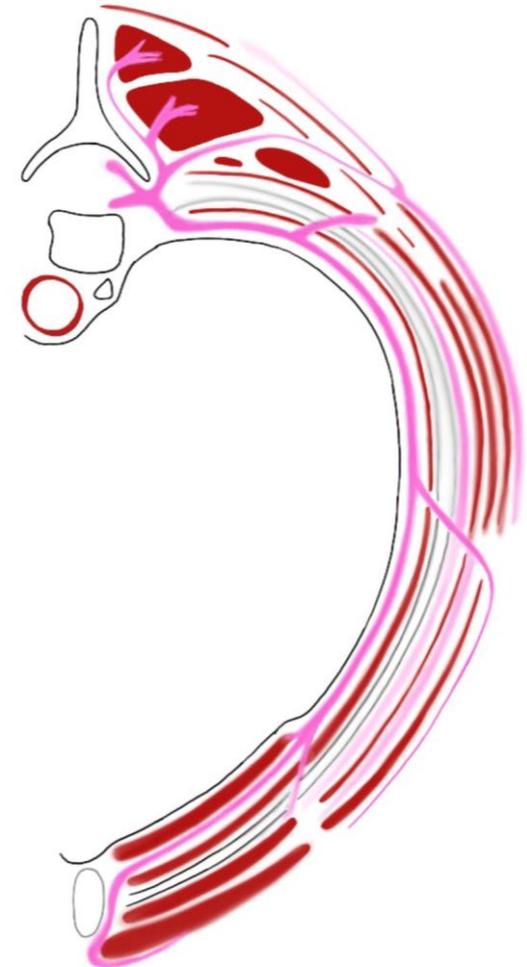
# PNS - Spinalnerven





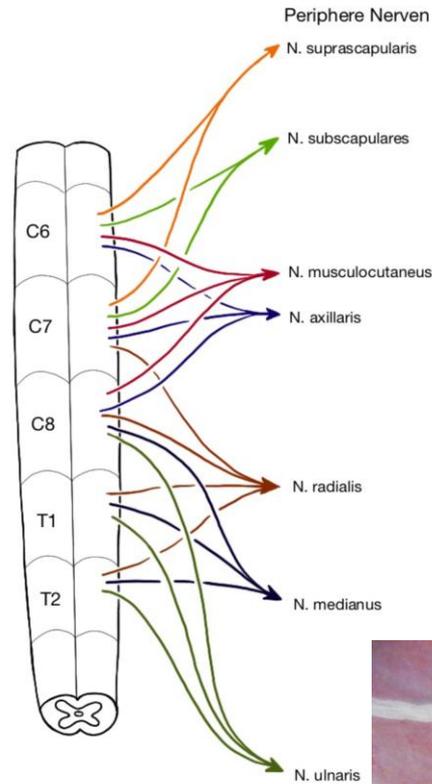
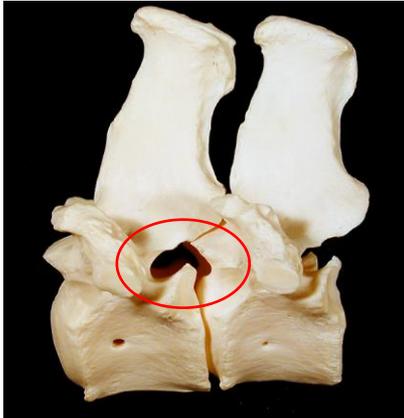
# PNS - Spinalnerven

- **Ramus dorsalis (Dorsalast)**
  - Motorische Innervation der epaxialen Stamm Muskulatur
  - Motorische Innervation Hautmuskulatur
  - Sensible Innervation der Haut bis ca. Mitte Rumpf
- **Ramus ventralis (Ventralast)**
  - Motorische Innervation der hypaxialen Stamm Muskulatur
  - Sensible Innervation der Haut des Rumpfes (Mitte-ventral)
- **Beide Äste führen auch vegetative (sympathische) Fasern**
  - Blutgefäße
  - Schweißdrüsen
  - Haarbalgmuskeln

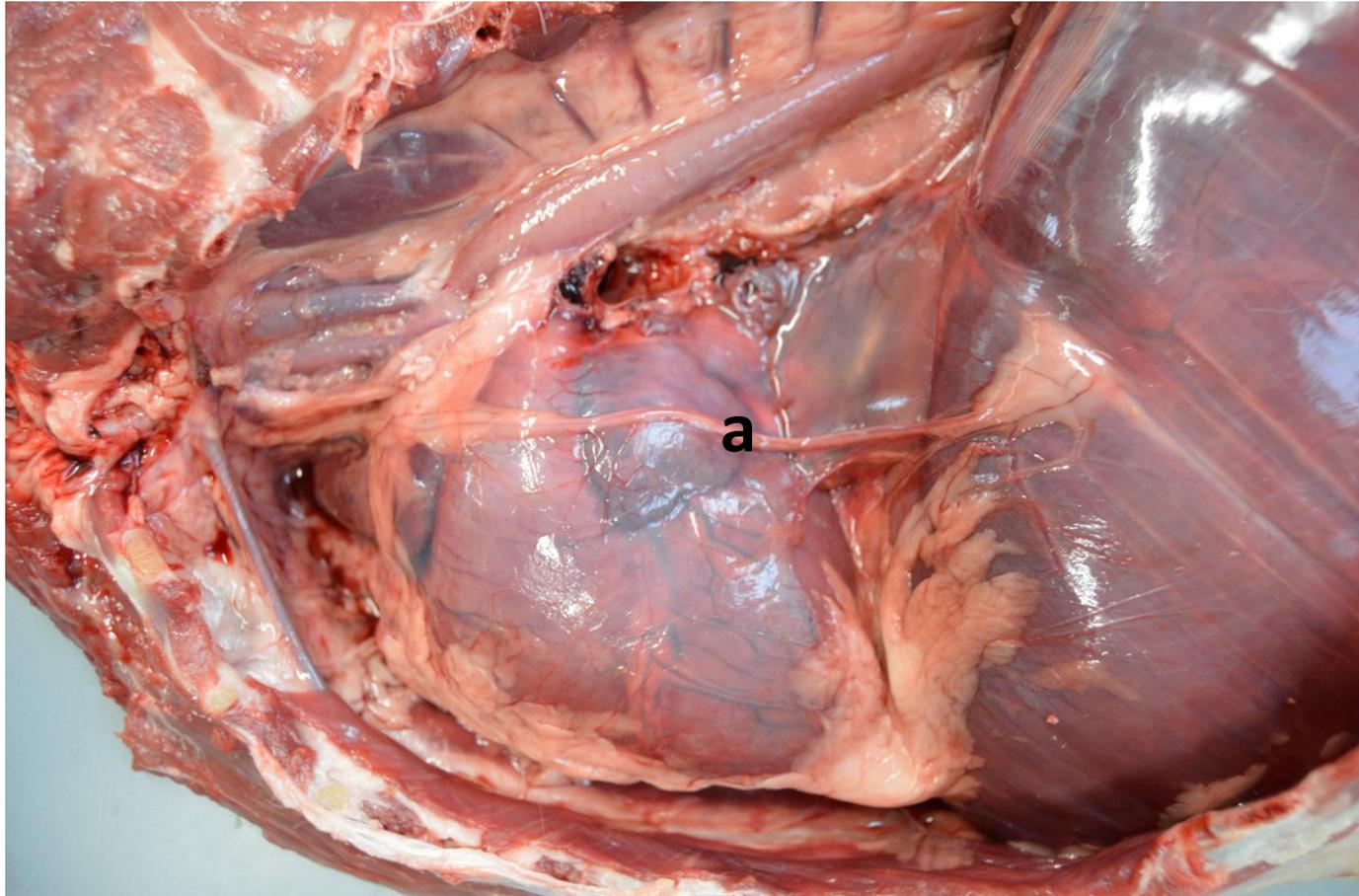




# PNS - Spinalnerven



Bilder: Dr. Jenny Hagen



## N. phrenicus (a)

- entspringt aus der Halswirbelsäule
- Innerviert das Zwerchfell



# PNS - Spinalnerven

- **Dermatom:** Hautbereich, der von einem Spinalnervenast sensibel versorgt wird
- **Autonome Zone:** Hautbereich, der von einem Plexusnerv sensibel versorgt wird
- **Myotom:** Muskeln / Muskelgruppen, die von einem Spinalnervenast motorisch versorgt werden
- **Head'sche Zone:** hypersensible Hautareale aufgrund Fehlinterpretationen (viszeraler) Afferenzen = gute Therapiemöglichkeiten von der „Oberfläche“ aus! (Massagen, Physiotherapie, Akupressur, Akupunktur, ...)

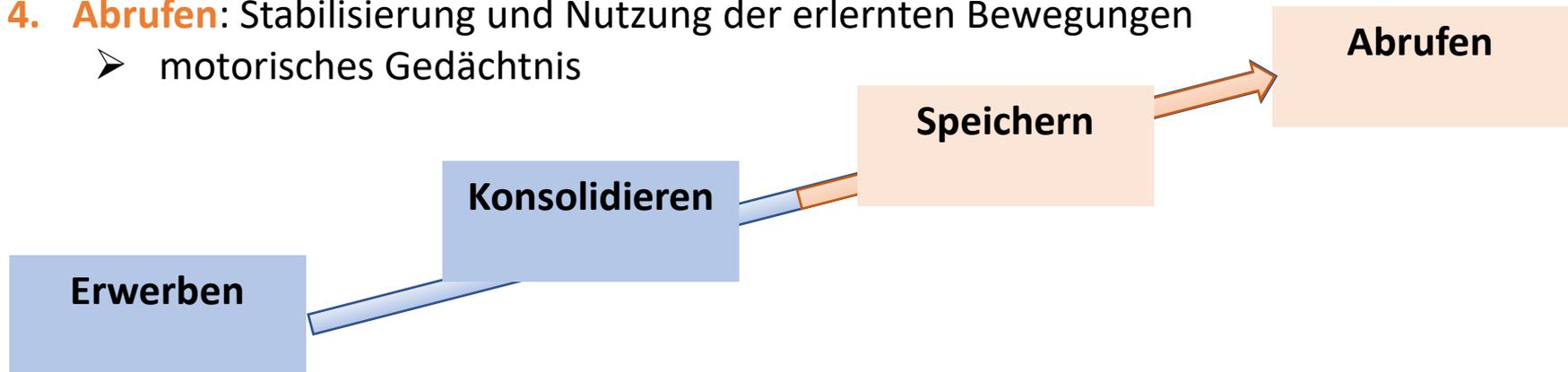




**“Das Nervensystem kontrolliert,  
koordiniert und ist verantwortlich für die  
eigene Homöostase (harmonisches  
Gleichgewicht) und die der anderen  
Systeme.”**



- 1. Erwerben:** - Aneignung, Ausführen neuer Bewegungsabläufe = Lernen
  - Beginn des motorischen Lernens
- 2. Konsolidieren:** Verbindung des Erworbenen mit anderen gespeicherten Informationen
  - kognitives und motorisches Lernen
  - schrittweise Entwicklung nach der Geburt/im Fohlenalter
  - zufällige Bewegungen werden mit gespeicherten Bewegungsmustern verknüpft
- 3. Speichern:** neuronale Verknüpfungen werden im gesamten Nervensystem gespeichert – insbesondere in Hirnarealen, Kleinhirn, Rückenmark, Nerven, Rezeptoren
  - Entwicklung eines motorischen Gedächtnisses
- 4. Abrufen:** Stabilisierung und Nutzung der erlernten Bewegungen
  - motorisches Gedächtnis





**Alter, Motivation, Genetik, Schädigungsort, Schädigungsausmaß beeinflussen Bewegungslernen, Bewegungsmuster und auch die Therapie von Dysfunktionen**





# Motorisches Lernen u. Gedächtnis

Bewegungsmuster werden zum Teil schon vor der Geburt und früh in der Entwicklung angelegt



Durch Training können neue Bewegungsmuster gebildet werden



## Die Entwicklung des Nervensystems wird beeinflusst durch:

- **das genetische Program**
  - Nervenzellen und Interaktion zur Geburt angelegt
  - Bewegungsmuster sind vererbbar
- **die epigenetischen Faktoren (Umwelt)**
  - pränatale Mikro-Umgebung
    - Neurogenese vor Geburt
  - äußere Umgebung
    - Neurogenese nach Geburt
    - Plastizität des Nervensystems (RM hat weniger Plastizität als der Cortex)
    - juvenile Fehlstellung können Bewegungsmuster im adulten Alter beeinflussen
    - Haltung und Management beeinflusst motorische Entwicklung



# Motorische Entwicklung

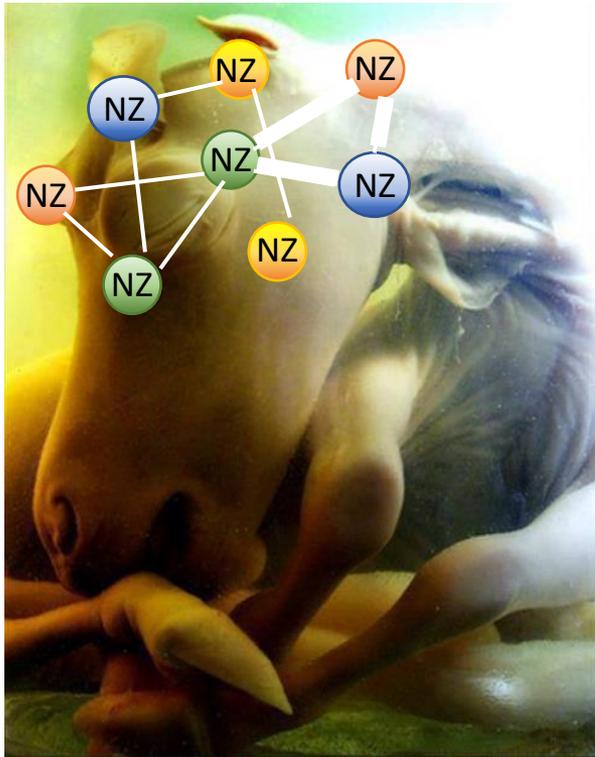
**Bewegungslernen** = Aufbau oder Korrektur von Bewegungsabläufen (Koordinationen) durch Lernprozesse (z.B. beim Laufen lernen, Tanzen, Radfahren, Schmieden)

Das **Bewegungslernen im Jungtialter** geht meist von **Erbkoordinationen** aus = relativ starre, formkonstante Sequenz von Bewegungen, die weitgehend genetisch vorgegeben ("angeboren") ist und **bei allen Tieren einer Art in gleicher** Weise auftritt (Pferd → Fluchtverhalten)

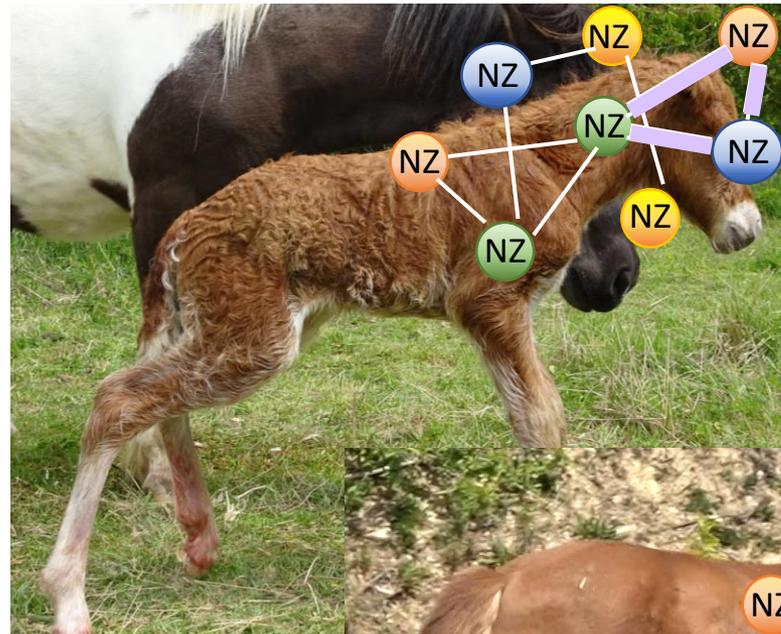
**Neuverknüpfungen** können durch Lernen und Umwelteinflüsse erweitert oder an andere Funktionen **angepasst** werden.



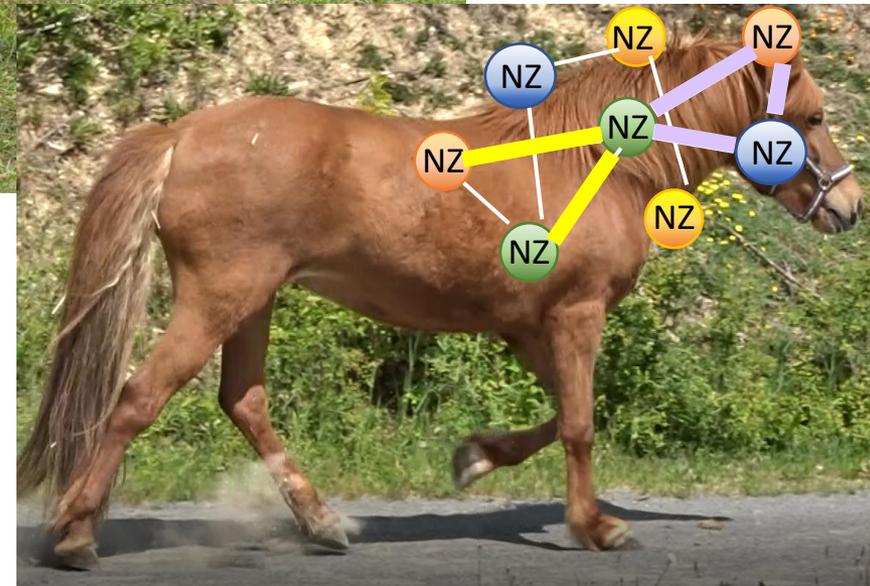
# Motorische Entwicklung



prä-natal



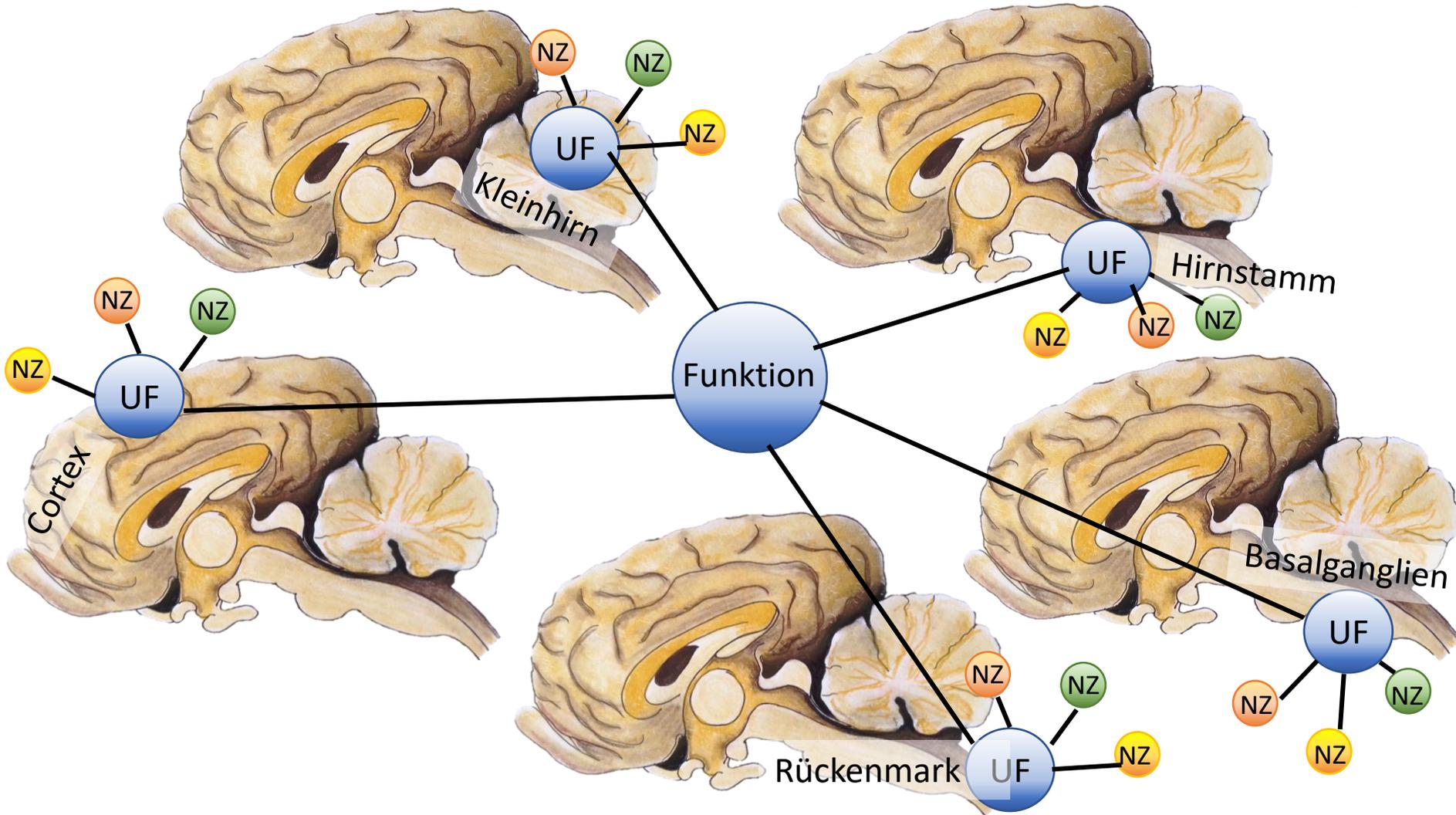
post-natal



adult



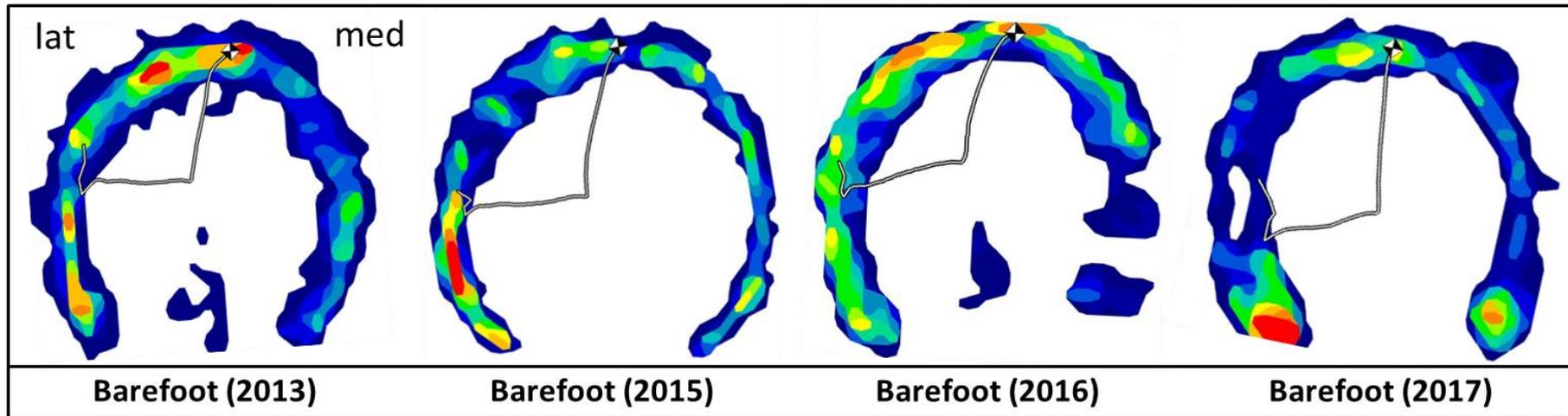
# Funktion durch Vernetzung



UF = Unterfunktion, NZ = Nervenzelle

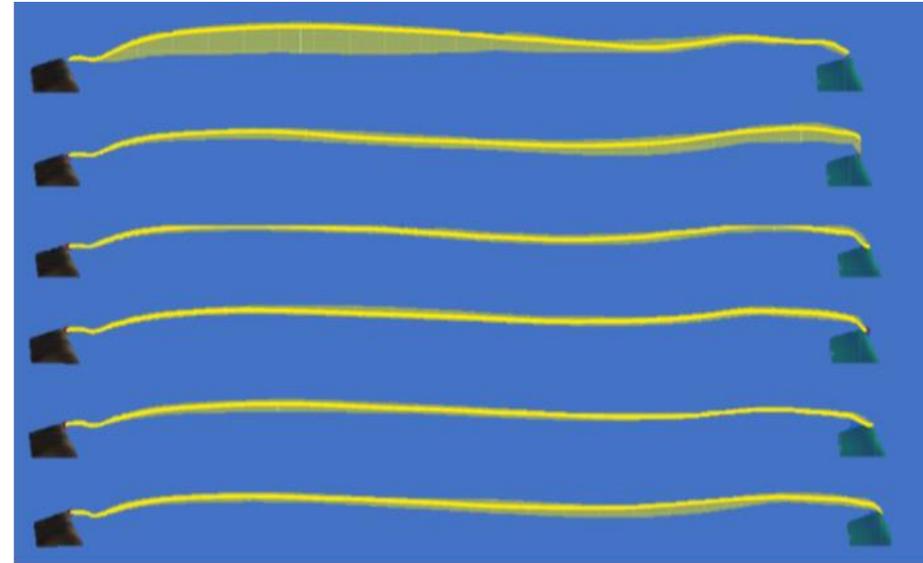
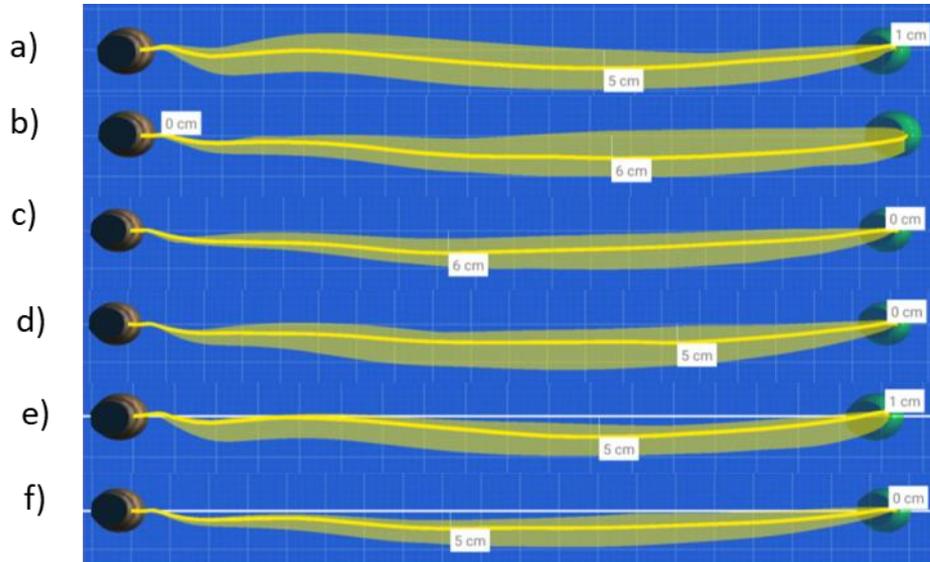


Je weniger ein Lebewesen seine Aufmerksamkeit auf den Bewegungsvollzug richten muss, desto besser und schneller wird es auf Veränderungen der Situationsbedingungen (Flucht) reagieren und um so variabler wird es seine Bewegungsabläufe neuen Gegebenheiten anpassen (Training) können.  
= Entlastung des Cortex.





# Bewegungsautomatisierung





# Hierarchie der Bewegung

- **Präfrontaler Kortex** = willkürliche Bewegung (Motivation, Intention, Idee)
- **Kleinhirn** = Bewegungslernen
- **Formatio retikularis** = Steuerung der Central Pattern Generators
  
- **CPG** (in cervikalen und lumbalen Verdickung des RM)
  - pränatale Verknüpfung von Nervenzellen
  - Bildung von festen Aktivitätsmustern
  - Baby macht Laufbewegung wenn man es hinstellt
  - Querschnittsgelähmte können Bewegung abrufen, wenn sie hingestellt werde und sensorischer Input stimmt
  
- evolutionär festgelegt
  
- Laufenlernen im ersten Moment willkürlich
- Ansprechen und Festigen der pränatalen neuronalen Verknüpfungen

= **Bewegungsautomatisierung**



# Bewegungsmuster

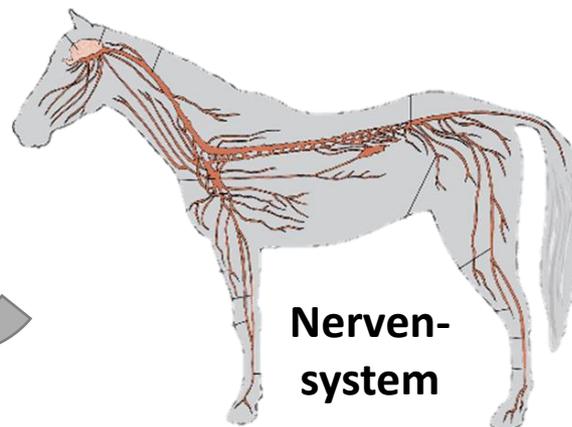
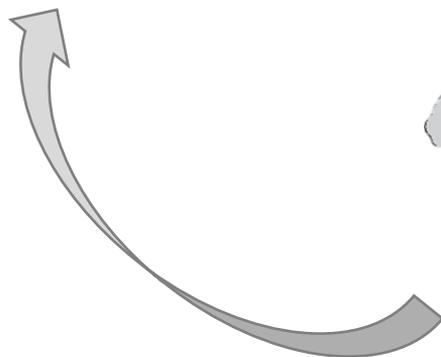


aktiver Bewegungs-  
apparat

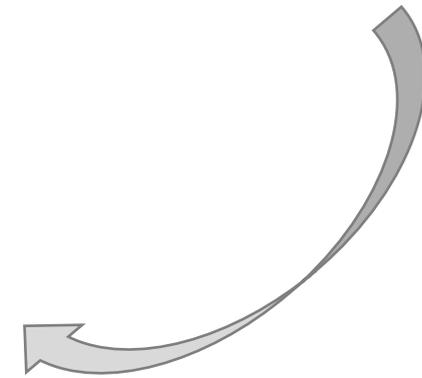
„Ein  
normales **Gangbild** ist  
durch harmonische und wohl  
koordinierte  
**Segmentbewegungen der  
Gliedermaßen**  
gekennzeichnet.“



passiver Bewegungs-  
apparat



Nerven-  
system





Neural Networks

Volume 21, Issue 4, May 2008, Pages 642-653



2008 Special Issue

## Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review

Auke Jan Ijspeert 

### „zentraler Mustergenerator“

- = spezielle Netzwerke von Nervenzellen im Rückenmark
- Selbstständige Veranlassung von rhythmische Muskelkontraktionen (alternierende Aktivierung von Extensoren und Flexoren)
- Generierung von automatisierter und kontinuierlicher Bewegungen (z.B. Gehen)

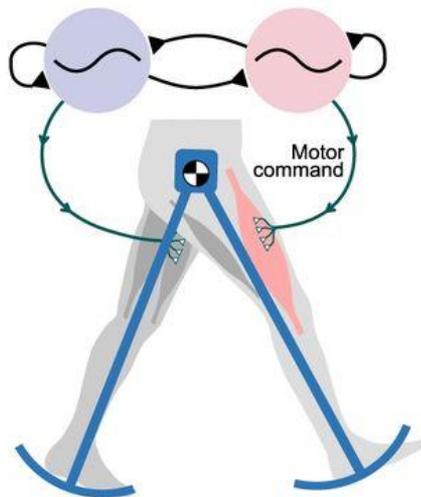


## An optimality principle for locomotor central pattern generators

Hansol X. Ryu, Arthur D. Kuo

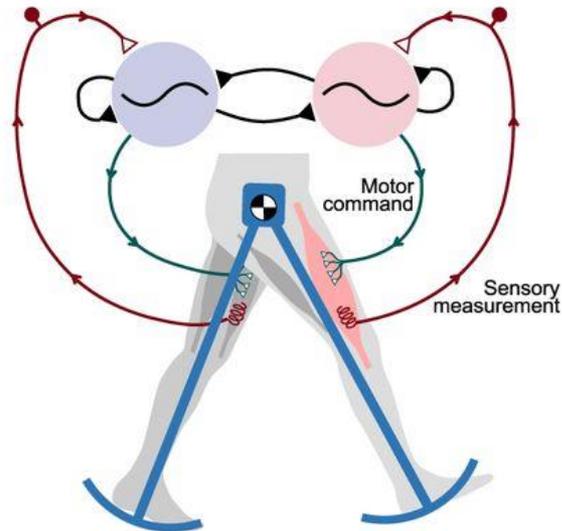
doi: <https://doi.org/10.1101/2019.12.30.890152>

### (A) CPG model



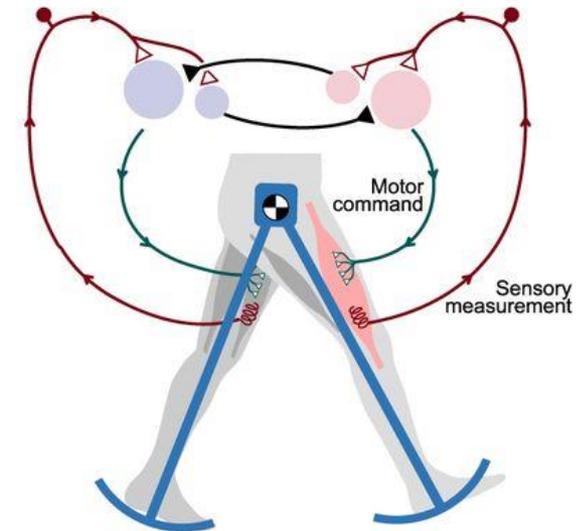
Absolut automatisierte  
Kontrolle

### (B) Combined model



Periphere Beeinflussung  
des automatisierten  
Bewegungsablaufes

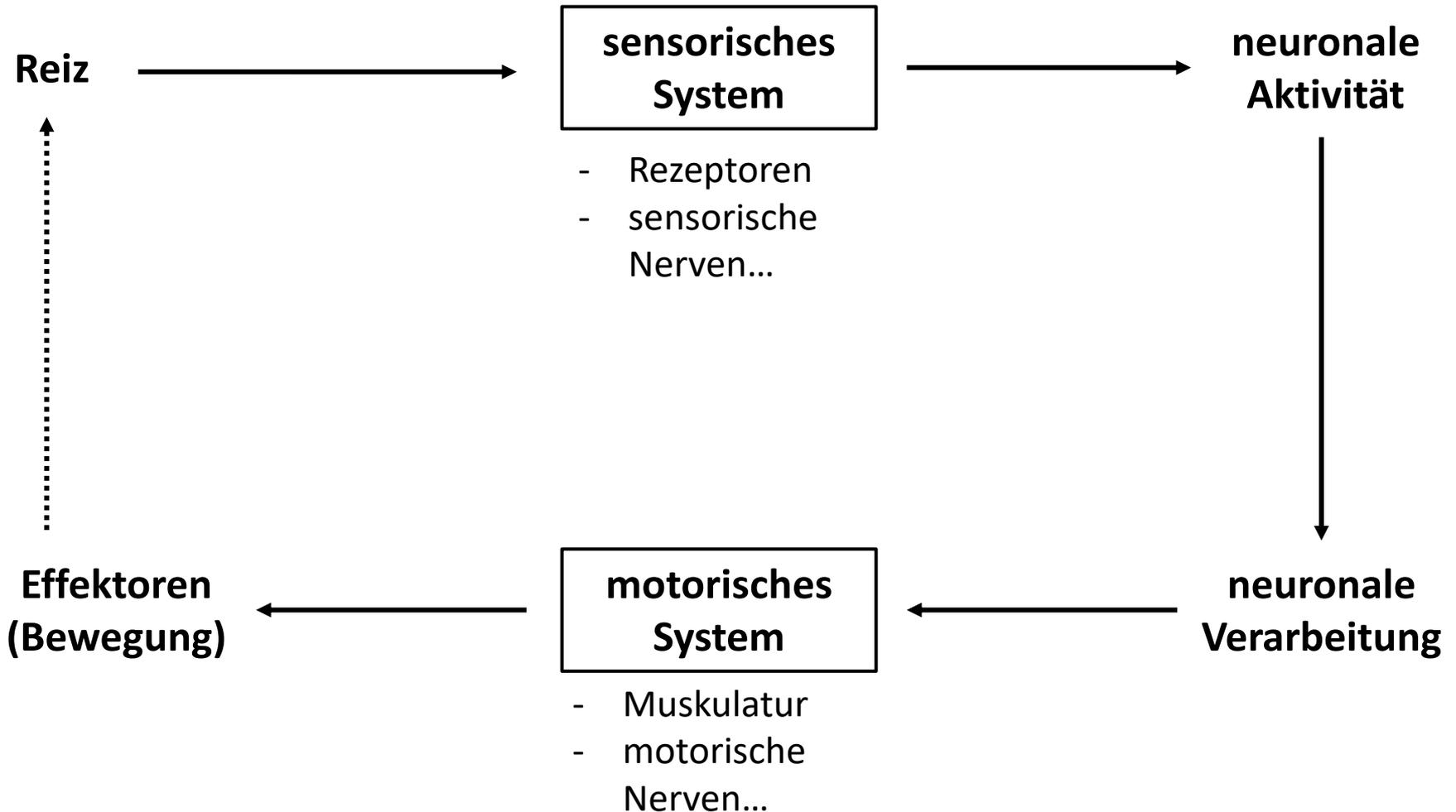
### (C) Reflex model



Absolut Feedback  
abhängige Kontrolle



# Entstehung von Bewegung





# Entstehung von Bewegung

- Rezeptoren nehmen Reize auf
- Sensorisches System “übersetzt” Reize für das ZNS
- darauf hin erfolgt neuronale Aktivierung über aufsteigende Nervenbahnen
  - Axone der peripheren sensorischen NZ bringen Reiz als elektrische Information an Dendriten der NZ im ZNS
  - Depolarisierung
  - Freisetzung von Neurotransmittern
  - Elektrochemische Aktivität
- Neuronale Verarbeitung
- Rückmeldung an die Peripherie über absteigende Bahnen
- Aktivierung des motorischen Systems

- 
- neuer Reiz an sensorisches System (Mechanorezeptoren, Propriozeptoren)



## Die Motorik ist abhängig von sensorischem Input!

**Mangel an Bewegung (Haltung, Management, Reiz armes, monotones Training, Hypotrophie, Spasmus)**

- = weniger Reize
- = weniger neuronale Aktivität
- = weniger neuronale Verknüpfung

**Therapie = Steigerung der Reize** (Balance Pads, Geländerritte) und Aktivierung des Nervensystems

- guter Einfluss auf Haltung, Tonus, Bewegungsmuster
- weniger Einfluss durch Manipulationen am Bewegungsapparat





# Beeinflussung von Bewegung



Chiropraktik

Myofasziale Behandlung

Akkupunktur

**.....was passiert?!**



Osteopathie

Physikalische Therapie



# Beeinflussung von Bewegung



Propriozeptives Training



Engagement Training



Tensegrity Training

**....was passiert?!**



Gaitner Training



Stammer Kinetics



## Veränderung des sensorischen Inputs

- **Kurzfristige Veränderung des sensorischen Feedbacks vom Bewegungsapparat zum zentralen Nervensystem durch:**
  - muskuläre Behandlung
  - Gelenkmobilisierung
  - faszialer Behandlung
  - neurologischer Stimulierung
- Zunahme des segmentalen Bewegungsspielraums
- Abnahme der Muskelspannung
- Fasziale Entspannung
- **Für wenige Wochen nachhaltig, hohes Risiko schnell in das kompensatorische Muster zurück zu fallen**

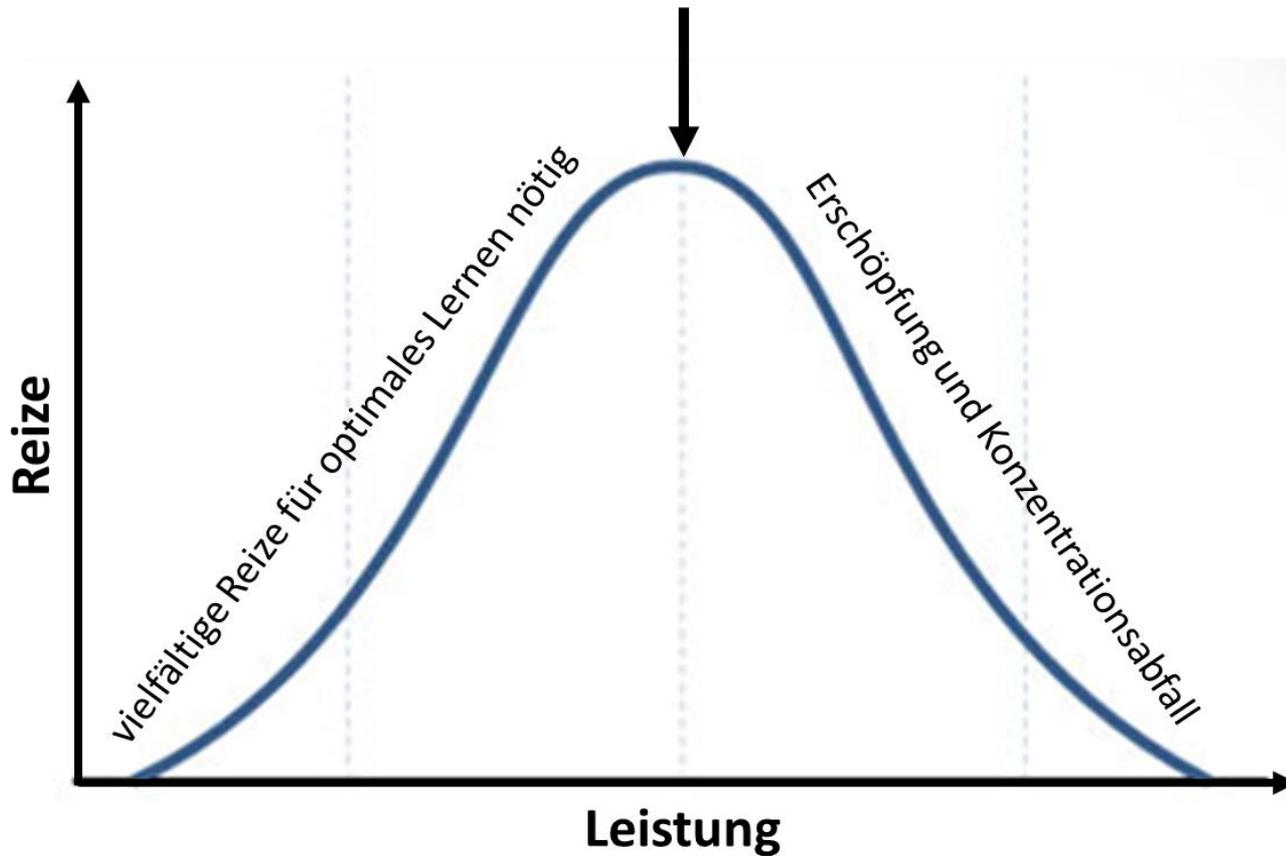
## Veränderung des Bewegungsmusters

- **Langzeittraining für eine nachhaltige Änderung der Belastung und des Bewegungsmusters durch:**
  - propriozeptives Training
  - Aktivierung des myofaszialen Gewebes
  - segmentale und dynamische Mobilisierung
  - motorisches lernen von physiologischen oder neuen Bewegungsmustern
- **Normaler Weise einfacher nach manueller Therapie durchzuführen, erhält, steigert und verbessert den Effekt der manuellen Therapie**



# Entstehung von Bewegung

Peak ist individuell und abhängig von Tagesform, Umwelt, Emotionen, physischer und mentaler Verfassung





# Entstehung von Bewegung

- **Empfangen von Reizen** – Rezeptoren
- **Transportieren** – ZNS
- **Dekodieren**
  - Ein Teil der Informationen wird nicht bewusst
- **Abwägen** – Priorisierung
- **Integrieren** (Gedächtnis + Vergleichen)
  - Integration der Informationen aus verschiedenen Sinneskanälen (Lernen)
  - Abgleich mit anderen Informationen und Erfahrungen
  - Entwicklung eines neuromuskulären Gedächtnis um sich auf andere Reize zu fokussieren und zu reagieren
  - Variabilität der Informationen wichtig (taktil, auditiv, visuell...)
  - Entwicklung einer Bewegungsintention
    - zu wenig Reize, weniger optimale Bewegung (unsicher, unkoordiniert, langsamer)
- **Vorbereiten** (sequenzielle Ordnung)
  - Vorbereitung des Bewegungsablaufes im NS
- **Ausführen** - Motorik



# Beeinflussung von Bewegung

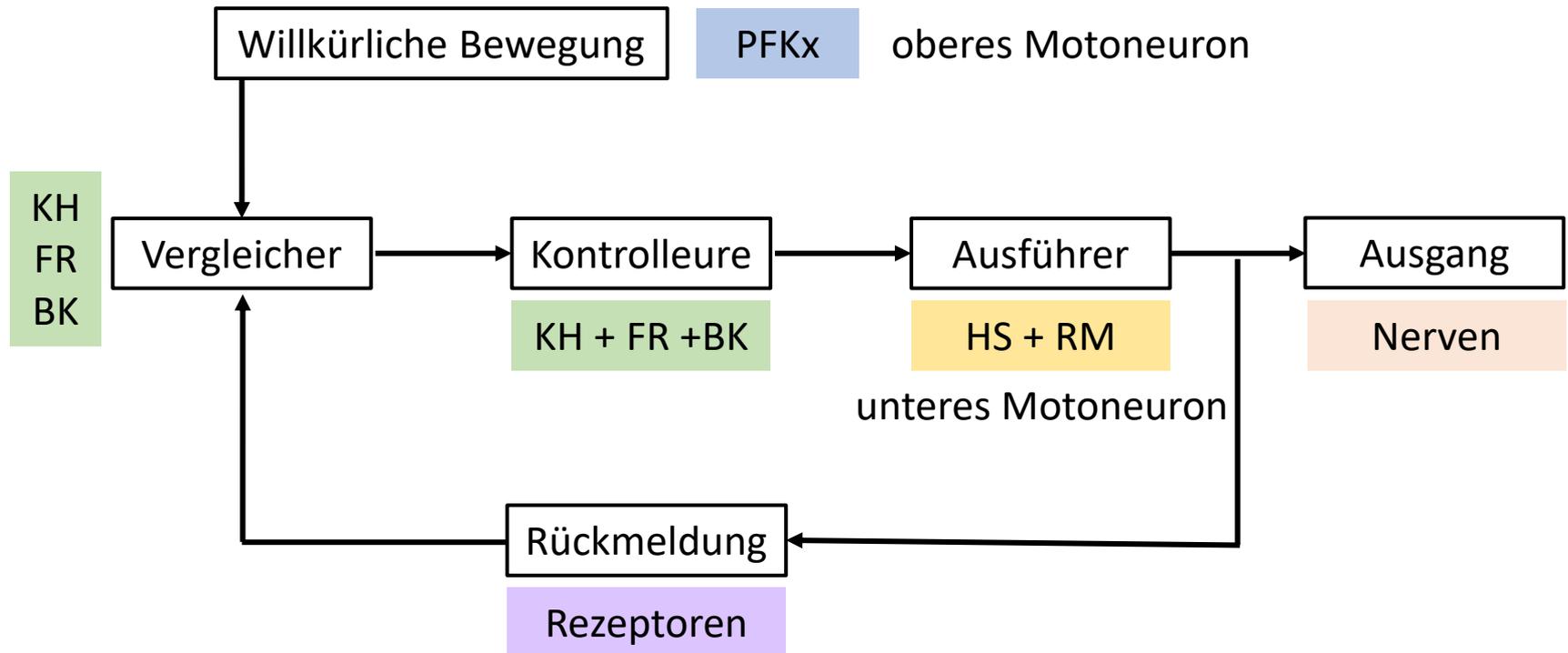
Optimierung/Änderung der physiologischen, individuellen Bewegungsmuster erfolgt nicht durch Manipulation des Bewegungsapparates, sondern **durch Änderung der Sensorik, der neuronalen Aktivität oder neuronalen Verarbeitung**





## Adaptiv – Reaktiv – Feedback – Rückmeldung

anpassend - reagierend - rückmeldend - nachgeschaltet





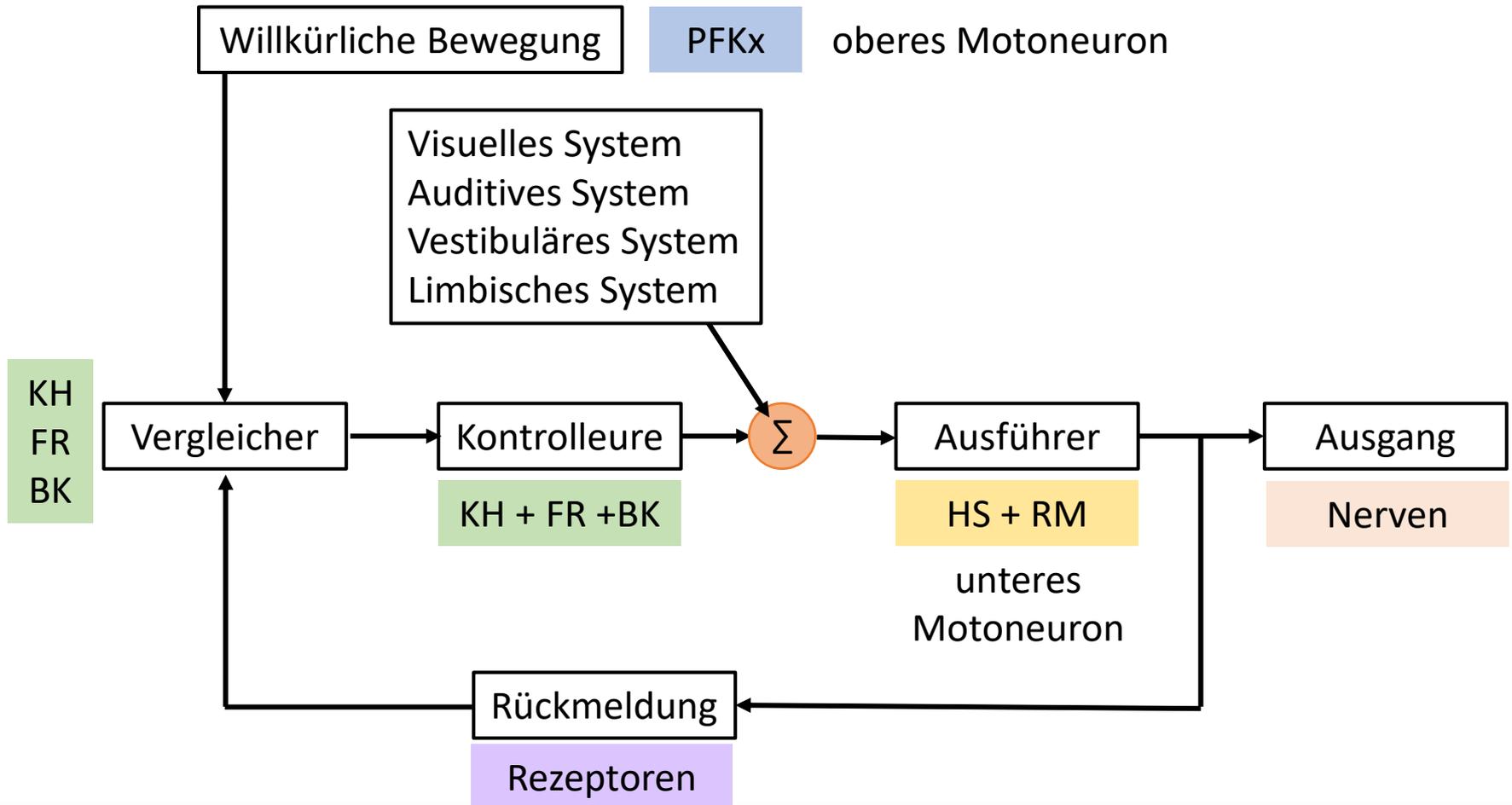
## Die Sensorik hilft der Motorik – als Feedback

- **Bewegungsidee/-motivation** wird im präfrontalen/prämotorischen Kortex geboren
  - unwillkürliche Bewegungen und Reflexe laufen ohne präfrontalen Cortex ab
- **Kopie der Bewegungsidee** an Kleinhirn, Formatio retikularis und Basalkerne
  - KH, FR, BK arbeiten unbewusst als Kontrolleure der präfrontalen Bewegungsintention
  - Automatisierung
  - Kortex kann sich mit wichtigeren Sachen beschäftigen
  - Abgleich und Modulation der Bewegung
- **Aktivierung des oberen Motoneurons** im motorischen Kortex
- **Aktivierung des unteren Motoneurons** in Hirnstamm und Rückenmark aktiviert
- **Auslösung der Bewegung**
- Rezeptoren geben Feedback an “Vergleicher” – KH, FR, BK
- **Anpassung** und Feinjustierung der Bewegung



## Antizipatorisch – Prädiktiv – Proaktiv – Feedforward

vorwegnehmend - vorhersehend - vorausplanend - vorgekoppelt





## Die Sensorik hilft der Motorik – als Vorbereitung

- **Bewegungsidee/-motivation** wird im präfrontalen/prämotorischen Kortex geboren
- **Kopie der Bewegungsidee** an Kleinhirn, Formatio retikularis und Basalkerne
- + **Integration des sensorischen Inputs** vor Bewegungsauslösung
- **Aktivierung des oberen Motoneurons** im motorischen Kortex
- **Aktivierung des unteres Motoneuron** in Hirnstamm und Rückenmark aktiviert
- **Auslösung der Bewegung**
- Rezeptoren geben Feedback an “Vergleicher” – KH, FR, BK
- **Anpassung** und Feinjustierung der Bewegung

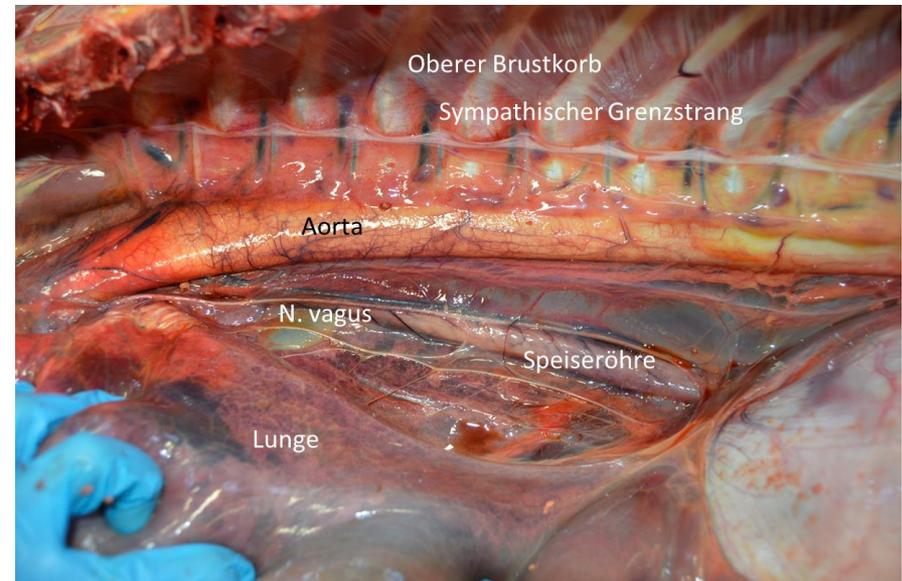


## Exterozeptoren (in Haut und Schleimhaut)

- Schmerz
  - Tastsinn
  - Druck
  - Temperatur
- } durch physikalische Therapie beeinflusst

## Interozeptoren

- Viszerozeptoren
  - Chemozeptoren
  - Barozeptoren
  - Osmozeptoren
  - Gravizeptoren
- } durch fasziale Therapie und Osteopathie beeinflusst





## Besondere Rezeptoren

- Sehen
  - Hören
  - Riechen
  - Schmecken
  - Vestibuläres System
- } Einfluss auf  
Bewegungs-  
qualität



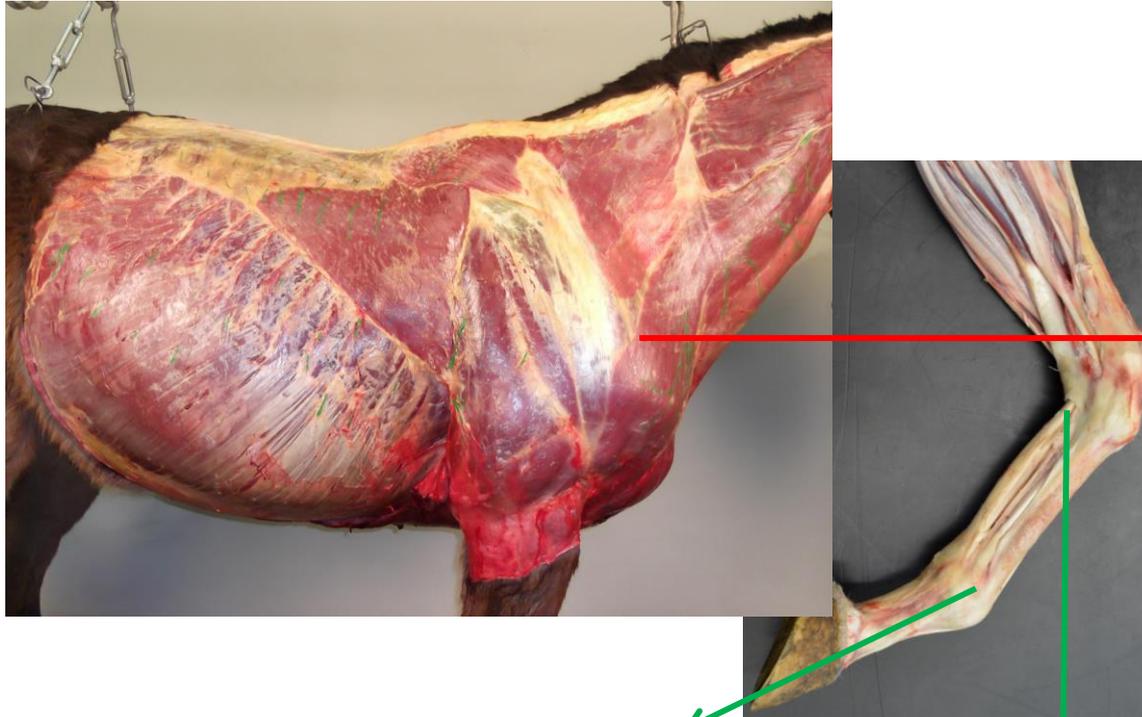
## Propriozeptoren

- Neuro-Muskuläre Spindeln
  - Neuro-Sehnenorgane
  - Rezeptoren der Gelenkkapseln
- } beeinflusst  
durch  
manuelle  
Therapie





# Propriozeptoren



**Muskelspindelzellen**

↑  
Rezeptoren  
des  
proximalen  
Bewegungs-  
apparates sind  
am  
schnellsten!!!  
↓

**Mechano-  
rezeptoren der  
Gelenkkapsel**

**Golgi  
Sehnenorgan**

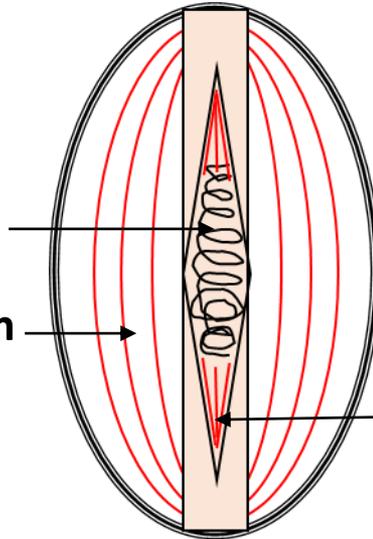


# Muskelspindelzellen

Ende des peripheren  
**Fortsatzes einer  
Nervenzelle**  
( $\gamma$ -Faser) die im  
Spinalganglion ist

**extrafusale Muskelfasern**

- Muskelkontraktion
- konzentrische  
Muskelarbeit



**intrafusale Muskelfasern**

- statische Muskelarbeit
- isotone Kontraktion
- Arbeitsmuskelfasern

## **Funktion:**

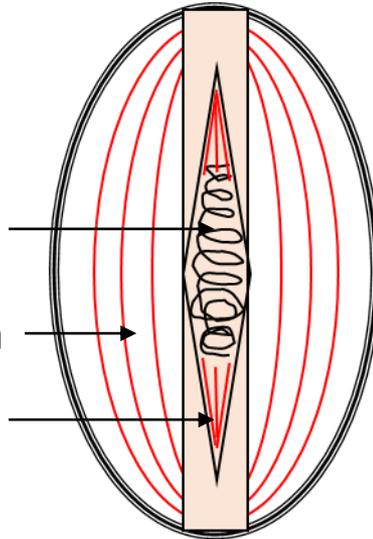
- Schutz vor Überdehnung der Muskeln
- Einstellung und Aufrechterhaltung einer konstanten Muskelspannung (Tonus)
- Aufrechterhaltung einer bestimmten Gelenk- und Körperstellung
- feinabstimmung von Bewegungen durch Zu- und Abschalten von Muskelfasern



# Muskelspindelzellen

Ende des peripherin  
**Fortsatzes einer  
Nervenzelle**  
( $\gamma$ -Faser) die im  
Spinalganglion ist

**extrafusale Muskelfasern**  
**intrafusale Muskelfasern**



## Steuerung einer gezielten Muskelbewegung:

- Muskelspindel in Ruhe-Vorspannung
- Befehl aus dem Zentralnervensystem
- Aktivierung der **motorischen  $\gamma$ -Fasern**
- neuer Soll-Wert für die aktive Vorspannung
- Kontraktion der **intrafusalen Fasern** an den Spindelfaserpole
- dehnen den zentralen Sensorbereich
- Längenänderung zum Rückenmark gemeldet
- Aktivierung der **motorischen  $\alpha$ -Neuronen**
- Muskelkontraktion durch Kontraktion der **extrafusalen Fasern**
- Entspannung der Sensorregion der Spindelfasern
- Stopp der Verkürzung des Muskels



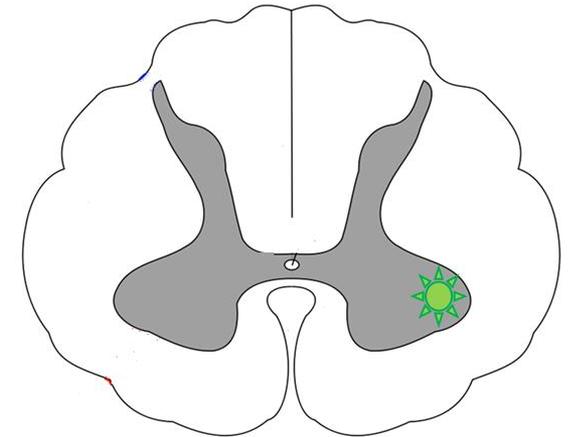
## Oberes Motoneuron (OMN):

- Ansammlung von Nervenzellen im motorischen Kortex (Frontallappen, primärer motorischer Kortex)
- Auslösung der Willkürbewegung, Aufrechterhaltung des Tonus der Antischwerkraftmuskeln, Regulation der Körperhaltung



## Unteres Motoneuron (UMN)

- Ansammlung von Nervenzellen in der Ventralsäule der grauen Substanz des Rückenmarks
- Bei Muskeln für diffizile Bewegungen versorgt 1 MN 5-20 Muskelfasern
- Bei Muskeln für wenig differenzierte Bewegung versorgt 1 MN bis zu 500 Muskelfasern

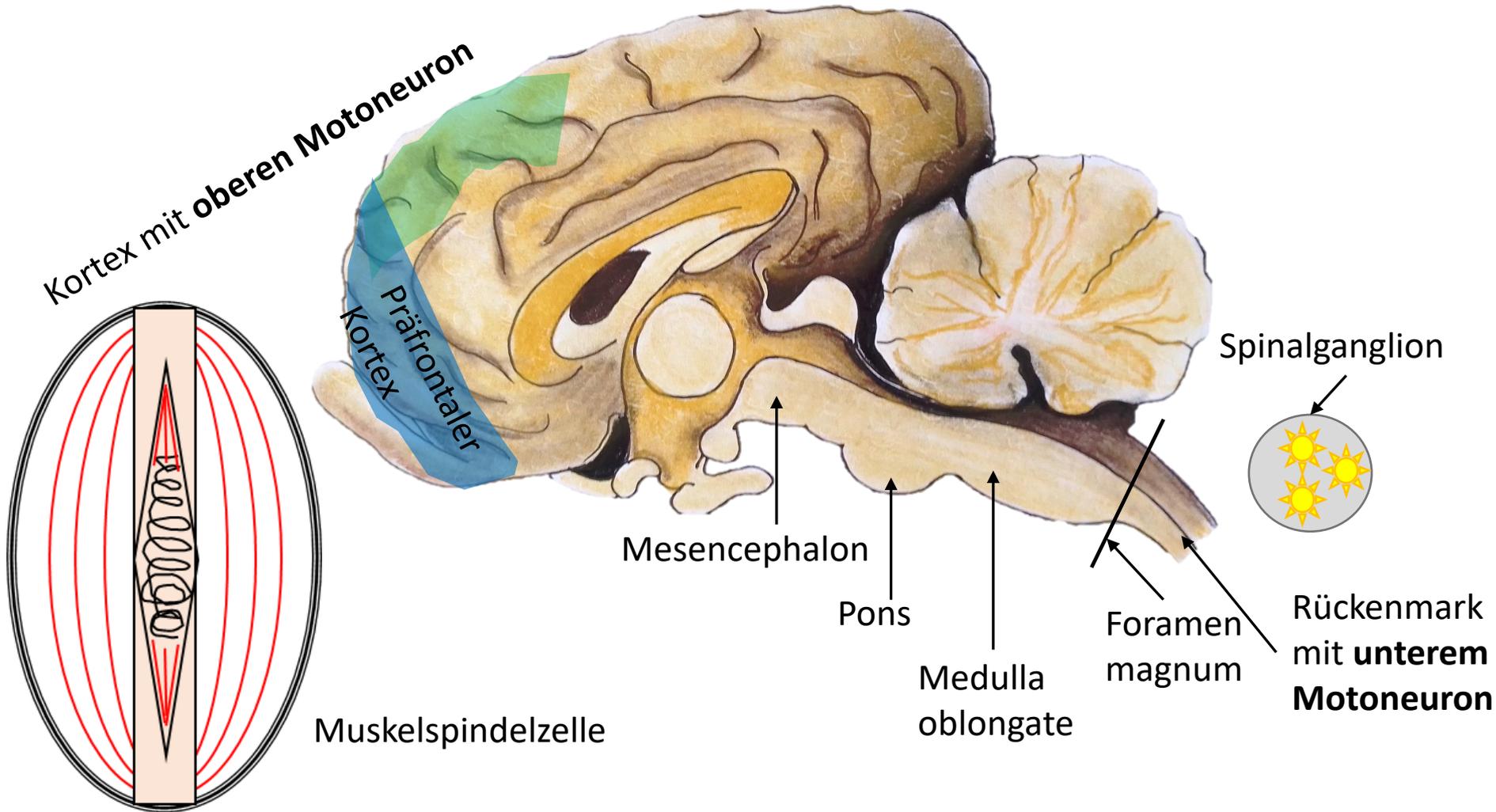


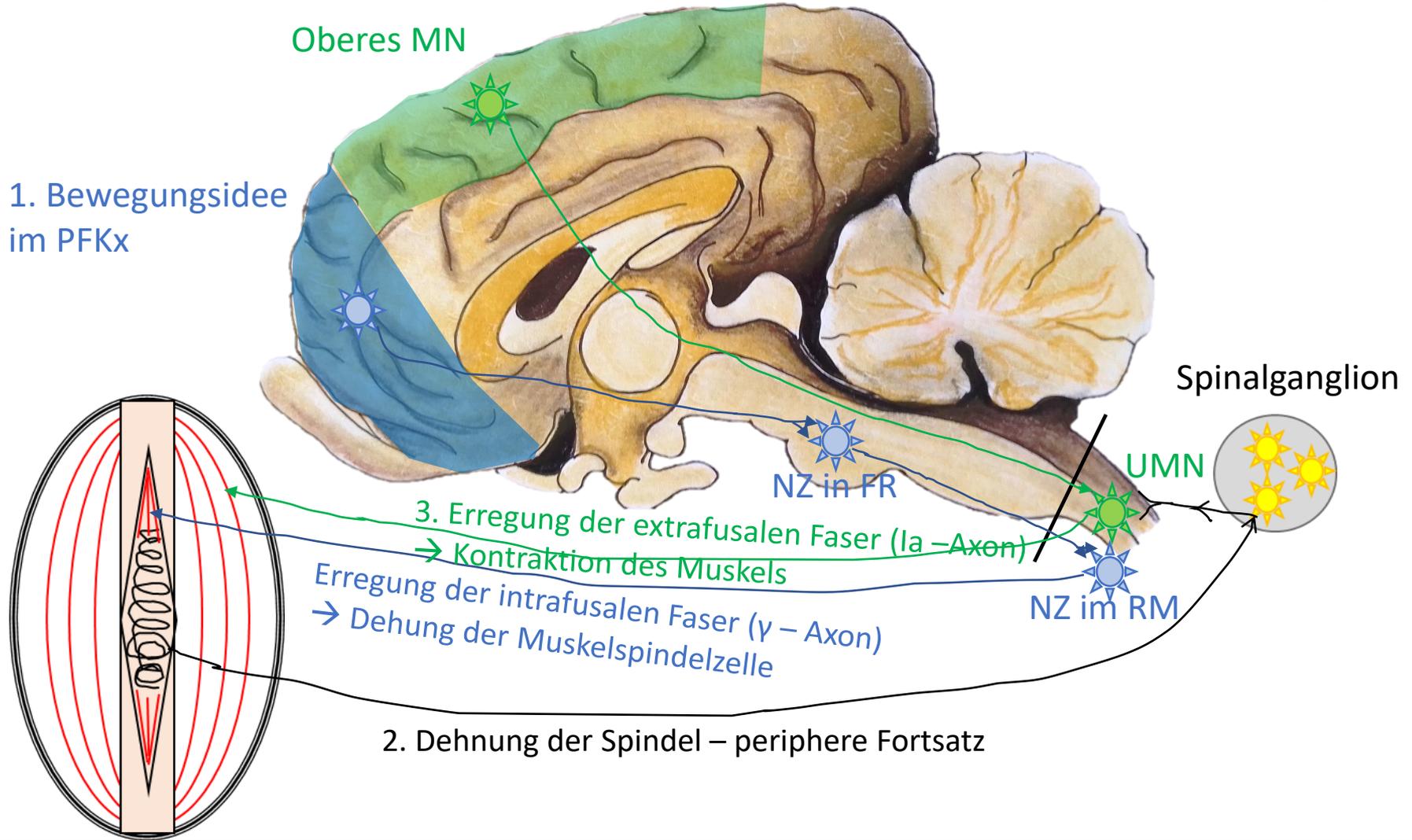
## Außer bei Reflexen steht das UMN unter Kontrolle des OMN

- Verbindungen sind Leitungsbahnen des **pyramidalen** (fein abgestimmte Bewegungen, monosynaptisch) und **extrapyramidalen Systems** (Kontrolle größerer, stereotype Bewegungsabläufe, polysynaptisch = Umschaltung in Kerngebieten)



# Funktionelle Neuroanatomie



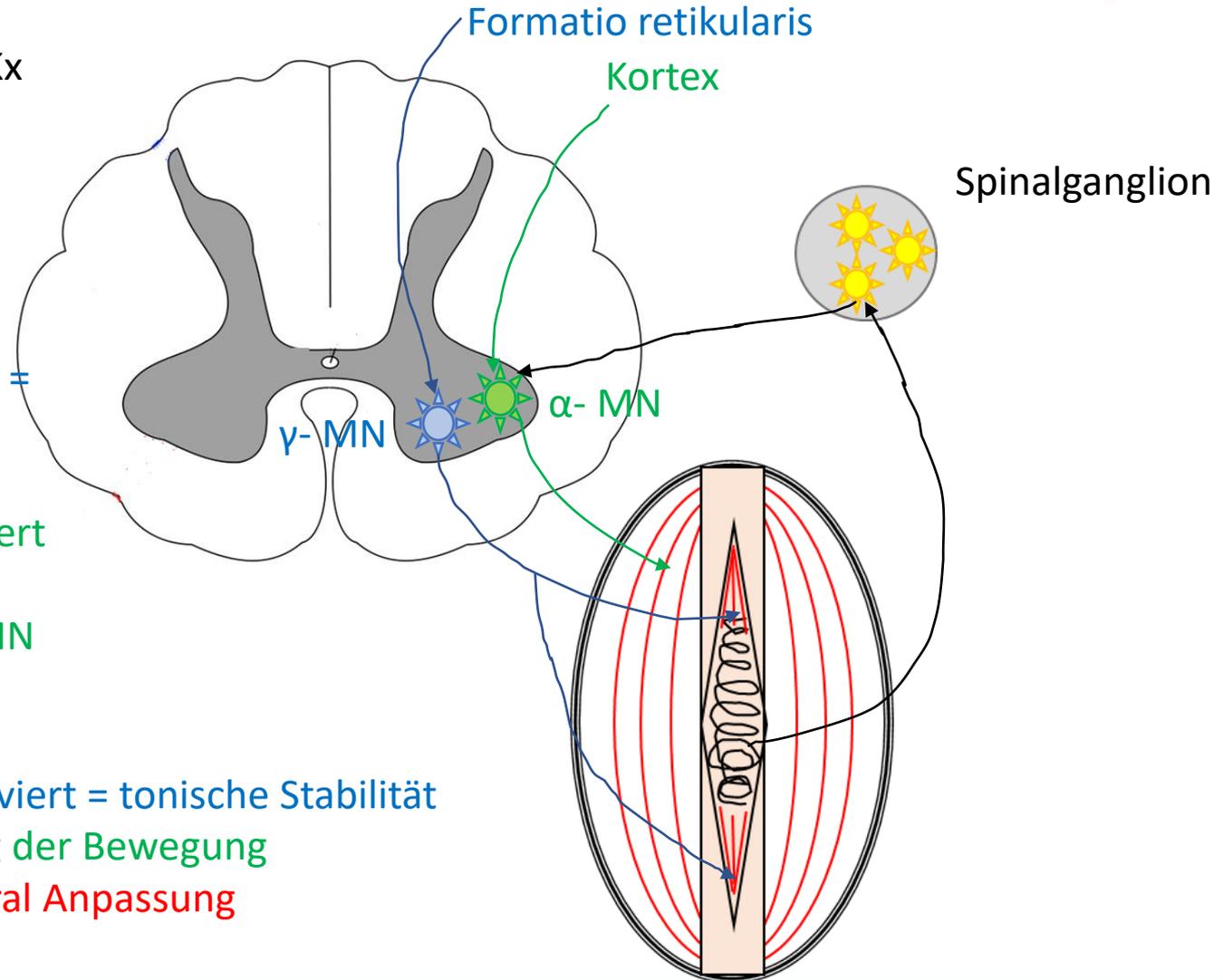


- Bewegungs idee im PFKx
- FR feuert 70 ms vor Bewegungsinitiierung

- $\gamma$ -MN – innerviert intrafusale Fasern
  - Aktiviert durch FR = Vorbereitung

- $\alpha$ -MN (OMN) – innerviert extrafusale Fasern
  - Aktiviert durch OMN im Kortex

- immer erst  $\gamma$ -MN aktiviert = tonische Stabilität
- erst dann Ausführung der Bewegung
- = antizipatorische postural Anpassung





# Funktionelle Neuroanatomie

- Streckung der Gliedmaße
- **Dehnung der Spindel** → Information ins Rückenmark
- **Anspannung des Muskels** (durch  $\alpha$ -Motoneurone)
- **Dehnung der Sehne**
- **Aktivierung des Neuro-Sehnenorgans** → Information ans Rückenmark
- **Hemmendes Interneuron** im RM
- **Stoppen der Muskelanspannung**

= Schutz des Muskels, Koordination und Abstimmung von Bewegung

- Senken des Muskeltonus durch manipulation an Sehnendehnung!



**Haltung vor Bewegung**

**Stabilität vor Mobilität**

**Tonisch vor Phasisch**

- distale Stabilität für axiale Mobilität
- axiale Stabilität für distale Mobilität
  
- mobile axiale Stabilität
- stabile distale Mobilität



## Abhängigkeit vom Input des limbischen Systems = Emotionen

- stabilere, bessere postural Kontrolle bei guter mentaler  
Verfassung!!!



VS.

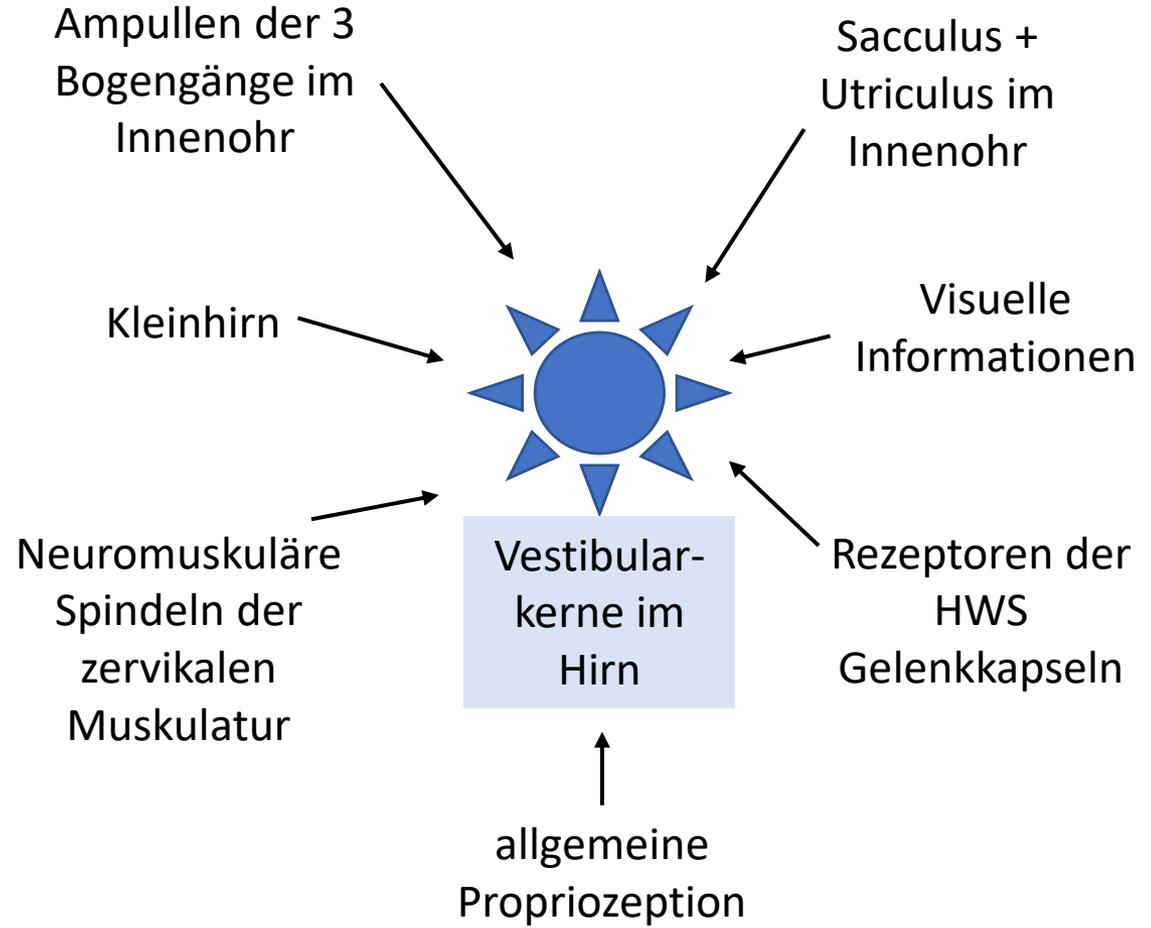
- |                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| - Stress          | - Entspannung       |
| - Angst           | - Positive Spannung |
| - Unsicherheit    | - Ruhe              |
| - Müdigkeit       | - Aufmerksamkeit    |
| - Depression      | - Freude            |
| - Burnout         | - Spaß              |
| - Abgestumpftheit | - Sicherheit        |
| - Schmerz         |                     |





# Gleichgewichtsorgane

Bewegungsapparat  
Kortex  
Kleinhirn  
Formatio reticularis  
Hirnnerven  
Visuelles System  
Vestibuläres System  
Propriozeptoren  
Tastsinn/Druck  
Auditives System  
Basalkerne

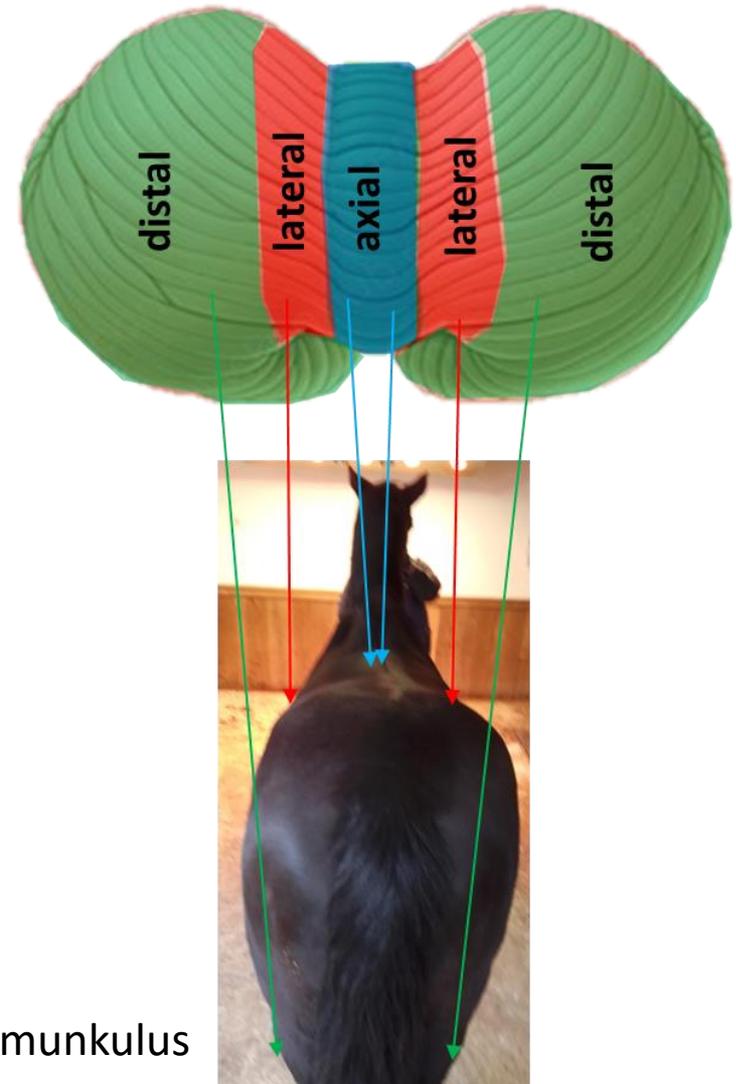




KH hat mehr Nervenzellen und Furchen als das Großhirn  
= **Filterfunktion, Bewegungskontrolle, Problemlösung**

- bekommt Infos von Propriozeptoren, Tastsinn, Druck, vestibulären, retikulären, kortikalen, spinalen, visuellen, auditiven, olivären Organen

- **Archicerebellum (Vestibulo-Cerebellum):**  
ältester Teil = Gleichgewicht
- **Paleocerebellum (Spino-Cerebellum):**  
nächster Teil = Muskeltonus (Bewegung)
- **Neocerebellum (Cerebro-Ponto-Cerebellum):** jüngster Teil = Feinmotorik



Motorischer Humunkulus



- **Mesencephalon (Mittelhirn)**
- **Pons (Brücke)**
- **Medulla oblongata (Verlängertes Mark)**
- Beherbergt Hirnnervenkerne, Auf- und Absteigende Bahnen und Formatio retikularis

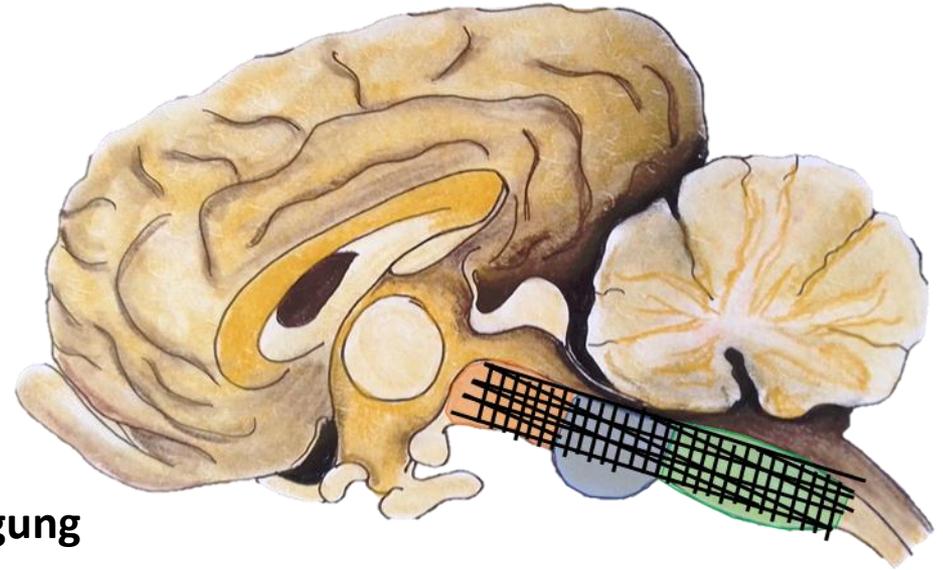
Modulierung  
der Aktivität des  
**unteren  
Motoneuron**





# Formatio retikularis

- Ganglienzellgruppe und Faserzüge
- Filterfunktion
- Posturale Kontrolle
- Beeinflussung des Cortex
- **Vorbereitung und Anpassung der Bewegung**
  - **Posturale Kontrolle**
    - Antizipatorisches posturales Anpassungssystem (APAS)
    - **preparing = Vorbereitend = pAPAS**
      - Nucleus reticularis pontis rostralis
      - Nucleus reticularis pontis caudalis
      - Vorbereitung des Armhebens durch axiale Stabilität (ca. 70 ms vorher)





## Aufsteigendes Retikuläres Aktivierendes System



- = diffus verteiltes Kerngebiet der Formatio reticularis
- allgemeine Aktivierung des gesamten Organismus
- "Wecksystem"
- Mobilisierung des Körpers innerhalb von unter einer Sekunde

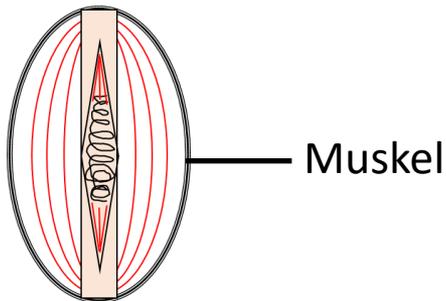
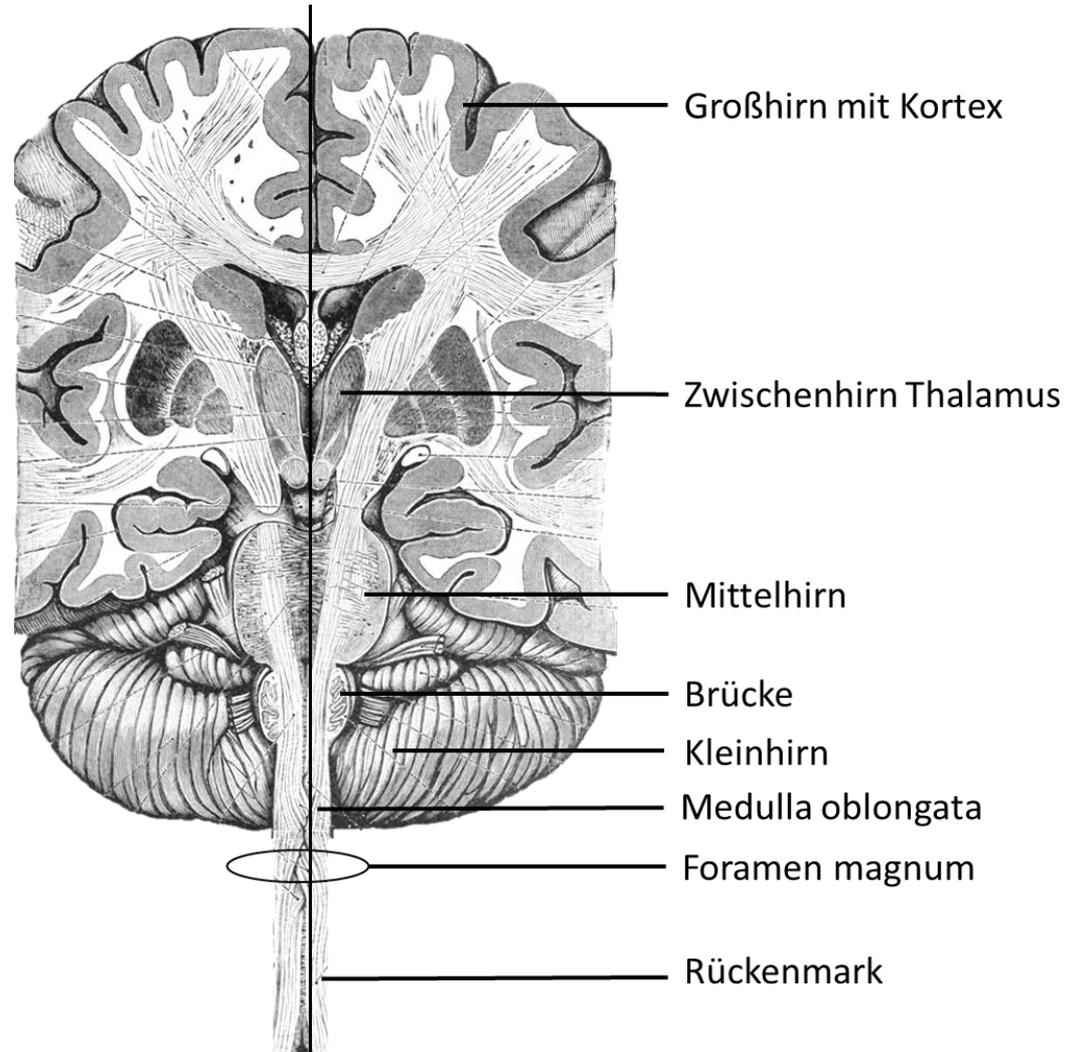


**Kontrolle des Feedbacks vom KH an das obere Motoneuron** vor Auslösung der initialen Bewegung → **Bewegungsautomatisierung**  
Striatum

- Cucleus caudatus
- Putamen
- Ganglion palladius
- Nucleus subthalamicus
- Substantia nigra
- Nucleus accumbens
  
- Benutzen GABA als Neutransmitter = hemmend



# Funktionelle Neuroanatomie





# Funktionelle Neuroanatomie

1. Entstehung einer Bewegungsidee im PFKx
2. Kopie an das Kleinhirn
3. Bewegungskontrolle
4. Bewegungsmodulation und Rückmeldung an das OMN
5. Auslösung der Bewegung am OMN
6. Auslösung der Bewegung am unteren MN

Bewegungsinitiierung

Vorbereitung der Bewegung

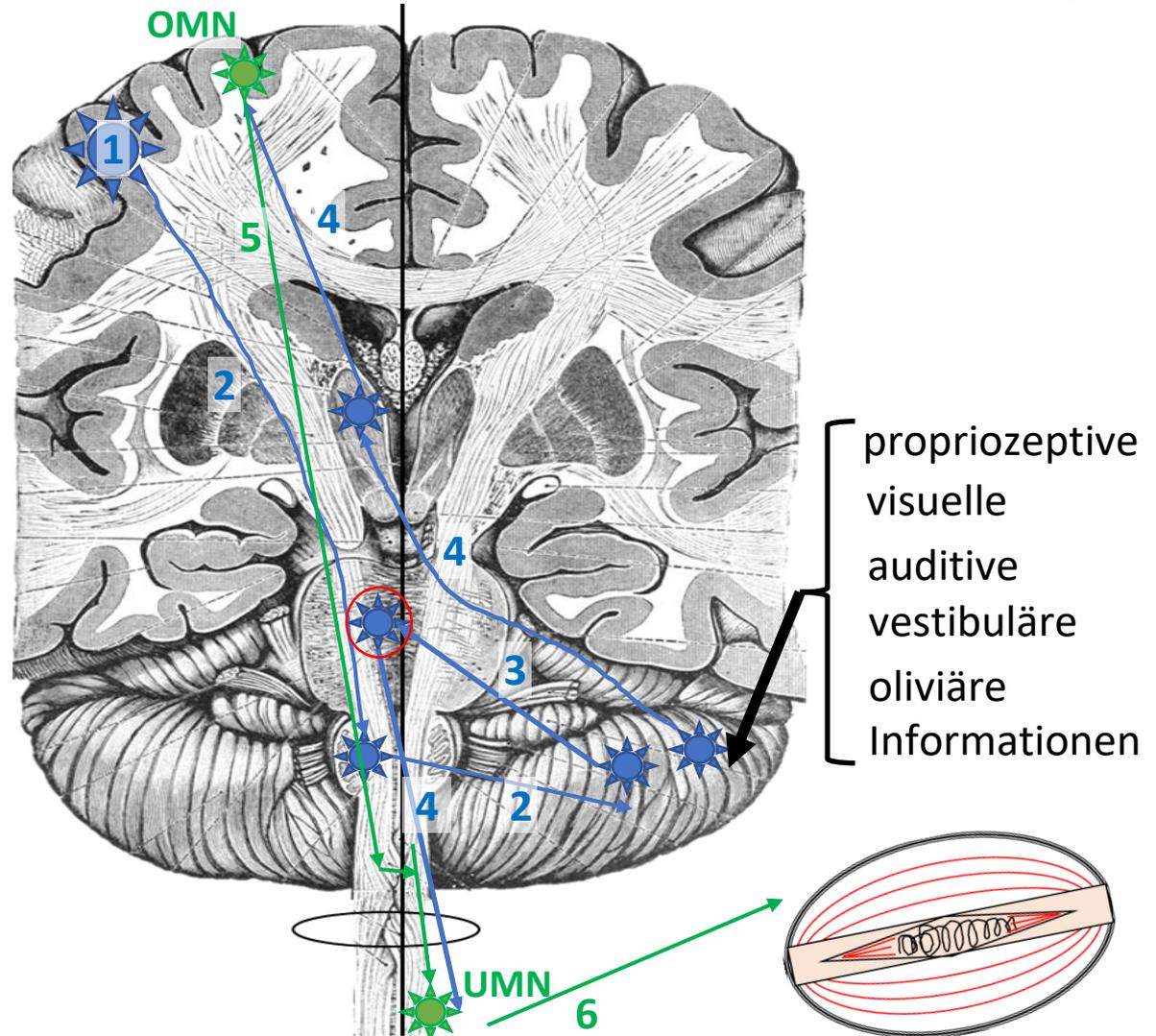
Ausführung der Bewegung





# Funktion der Basalkerne

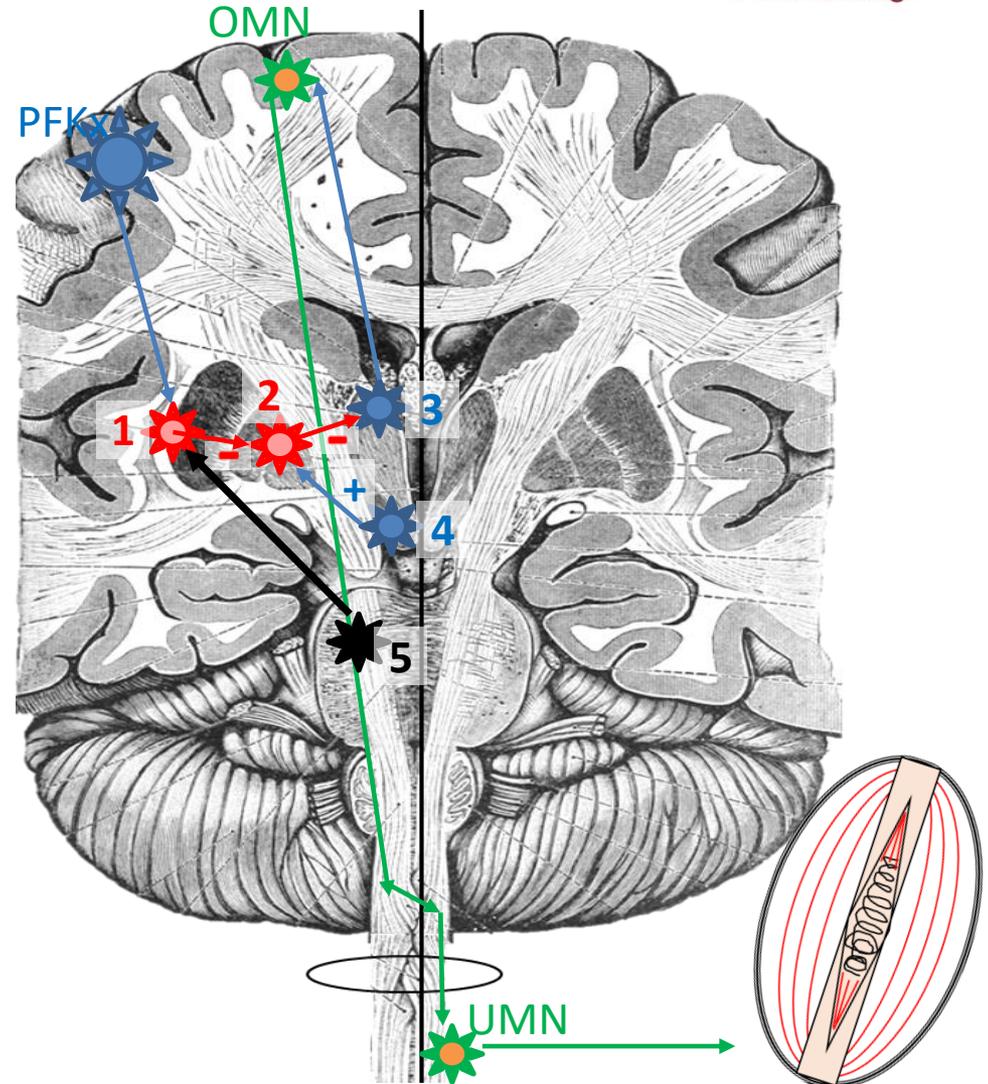
1. Bewegungsidee im PFKx
2. Kopie der Bewegungsintention an KH
3. Bewegungskontrolle im **N. ruber** im Mittelhirn (zeitliche Abstimmung)
4. Weitergabe der modulierten Bewegungsinformation an Mittelhirn, Thalamus, motorischen Kortex
5. Auslösung der finale Bewegung am OMN
6. Auslösung der Bewegung am UMN ( $\alpha$ -MN)





# Funktion der Basalkerne

- Aktivierung vom OMN durch Thalamus (und damit Aktivierung des UNM ) muss kontrolliert werden
- passiert durch Basalkerne
- Bewegungsintention vom PFKx geht auch zum Striatum (1)
- Striatum (1) hemmt Palladium (2)
- Palladium hemmt normalerweise Thalamus
- bei Enthemmung des Palladium durch Striatum geht Information vom KH durch den Thalamus (3) zum OMN
- Nucleus subthalamicus (4) erregt Palladium (2) und hemmt damit Thalamus damit nicht zu viele OMN erregt werden
- Substantia nigra (5) produziert Dopamin und schickt es zum Striatum (1) – dämpft und sensibilisiert Striatum für PFKx und hemmt unerwünschte Bewegungen durch Hemmung des Thalamus (4)
- Fehlt Dopamin – fehlt Dämpfung durch Sub. nig. – keine Reaktion des Striatum – keine Hemmung des Palladium – Hemmung des Thalamus – keine Bewegung





Fragen?

**“Es ist nicht kompliziert ... es ist nur  
komplex!”**

Prof. Nelson Annunciato

