

Besuch auf der Kommandobrücke: Biokybernetik

1. „Ich bin schon da...“

...*sprach der Hase zum Swinigel*. An dieses alte Märchen erinnert die Wissenschaftsgeschichte von Technik und Biologie, besonders in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts. Immer, wenn die Techniker und Ingenieure etwas (in ihren Augen) neues „erfunden“ hatten, kroch ein Biologe aus seinem Kämmerlein und höhnte: „Das gibt es schon seit Jahrmillionen!“. So z.B. beim Rückstoßprinzip (verwendet auch der Tintenfisch), dem Echolot (mit dem sich die Fledermäuse im Dunkeln orientieren) oder der Stromlinienform eines Torpedos (das man sich bei den Delphinen hätte anschauen können). Erst in den letzten Jahrzehnten haben die Ingenieure gelernt, sich zuerst in der Natur nach raffinierten Techniken umzuschauen, um diese dann nachzubauen, daraus entwickelte sich die „Bionik“. Der „Lotus-Effekt“ für selbstreinigende Oberflächen, z.B. Fassadenanstrichen, ist Ihnen sicher bekannt. Einen etwas anderen Weg nahm die Geschichte der in der Überschrift genannten „Biokybernetik“.

Hier wurde ein Arbeitsprinzip zuerst in der Technik entwickelt und danach auf biologische Vorgänge in Anwendung gebracht. Der Vorsatz „Bio-“ im Namen dieses Wissenschaftszweiges deutet schon an, dass die „Kybernetik*“ erst nachträglich in die Biologie eingeführt wurde. Was verbirgt sich hinter diesem Begriff?

2. „Ein Schiff wird kommen...“

Damit ein Schiff am Ziel ankommt, genügt es nicht, den gewünschten Hafen anzugeben. Während der gesamten Fahrt muss wegen ständig wechselnder Wind- und Strömungsverhältnisse der Kurs immer wieder korrigiert werden. Ein entscheidende Rolle spielt dabei der Steuermann auf der Brücke, der Ruderstellung und Maschinenkraft so einstellt, dass das Schiff den vom Kapitän vorgegebenen Kurs beibehält. Nach ihm erhielt die „Kybernetik“ ihren Namen: κυβερνήτης *kybernetes* ist das griechische Wort für „Steuermann“.

Als Wissenschaft entstand die Kybernetik in der Mitte des 20. Jahrhunderts. Sie erarbeitete fächerübergreifend Theorien zu Steuerungs- und Regelungsvorgängen. Das Spannende an dieser Theorieentwicklung war, dass überraschenderweise einer großen Zahl zunächst völlig unterschiedlich erscheinender Probleme aus Technik, Natur- und Wirtschaftswissenschaften, Politik und Psychologie die gleichen Funktionssysteme zu Grunde liegen. Sehr schnell bildete sich ein eigener Zweig als Biokybernetik heraus. Wir wollen einige grundlegende Elemente dieser Theorie kennen lernen. Dabei soll auch aufgezeigt werden, wie „praktisch“ eine gute Theorie sein kann, wenn man mit ihrer Hilfe komplexe Zusammenhänge auf ein grundlegendes „Denkmuster“ zurückführen kann.

3. Warum der „Steuermann“ eigentlich „Regelmann“ heißen müsste

Eines der wichtigsten „Denkmuster“ ist das Prinzip des Regelkreises. Seine Arbeitsweise lässt sich am namensgebenden Beispiel der Schiffssteuerung gut illustrieren: Die zentrale „Figur“ ist der Steuermann. Bei ihm laufen zwei Informationen zusammen:

- a. der vom Kapitän vorgegebene Kurs des Schiffes,
- b. die Daten der Navigationsgeräte (Kompass, Radar ...).

Aus diesen beiden Nachrichten ermittelt der Steuermann, ob und in welchem Maße der tatsächliche Kurs von der gewünschten Fahrtrichtung abweicht. Entsprechend verändert er die Stellung des Ruders oder die Maschinenkraft.

Im Sprachgebrauch der Kybernetik heißt diese Tätigkeit des „Steuer“mannes „Regelung“. Die bloße Veränderung der Ruderstellung (ohne Kontrolle!) ist (nur) eine „Steuerung“.

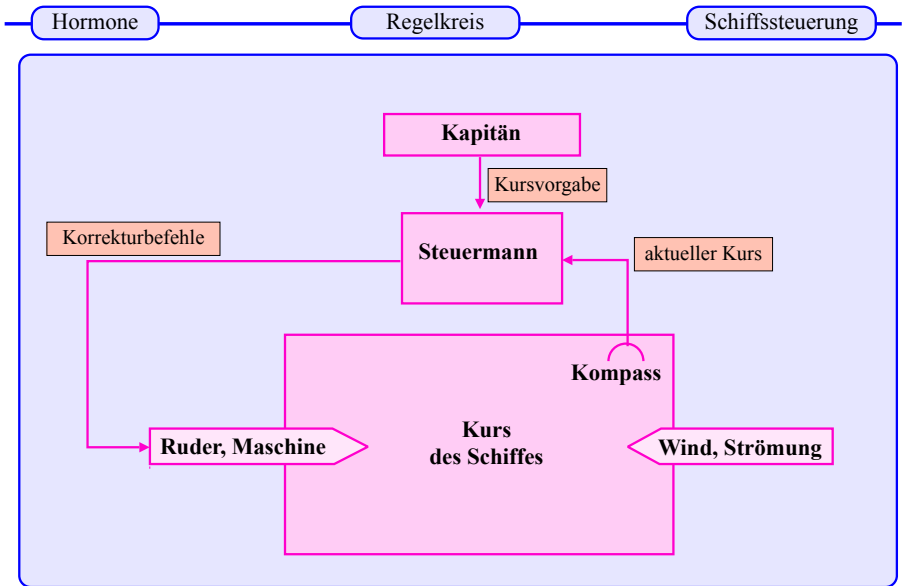
Die Beeinflussung eines Energie- oder Stoffflusses heißt
Steuerung.

Im Beispiel ist die Bewegung des Schiffes der „Stofffluss“.

„Regelung“ ist ein Spezialfall der Steuerung: Hier wirkt die Steuerungsmaßnahme einer (äußeren) Störung (hier Wind, Strömung) entgegen, um ihre Wirkung auszugleichen. Da dies mathematisch betrachtet einer Subtraktion entspricht, bezeichnen die Kybernetiker einen solchen entgegengesetzt wirkenden Befehl als „negative Rückkopplung“ (so wie eine Einzahlung auf ein Konto ein „Minus“ durch eine Abbuchung ausgleicht).

Regelung ist eine Steuerung mit negativer Rückkopplung.

Die Zusammenhänge veranschaulicht die nachfolgende Grafik:



Zur Darstellung von Regelkreisen sind verschiedene grafische Darstellungen gebräuchlich. In der Biologie hat sich besonders die hier gewählte Form durchgesetzt, die auf den deutschen Verhaltensbiologen BERNHARD HASENSTEIN (* 1922) zurückgeht. Er war maßgeblich an der Entwicklung der Biokybernetik beteiligt.

Der „Steuer“mann steuert also nicht nur, er „regelt“, jetzt sollte der Sinn der Kapitelüberschrift klar sein!

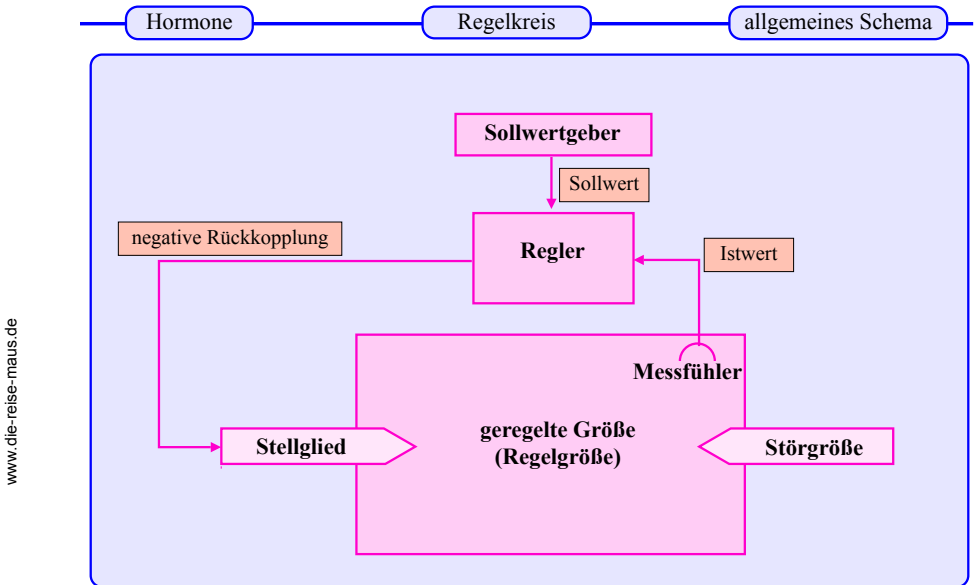
4. Das Denkschema „Regelkreis“

Um die Elemente eines Modells auf beliebige Spezialfälle anwenden zu können, gibt man ihnen allgemeine Bezeichnungen. Stören Sie sich bitte nicht an den sprachlich nicht immer ganz glücklich gewählten Begriffen, nehmen sie sie hin, so wie Sie es auch als Kind hingenommen haben, dass man Sie als Fritz, Franz, Julia oder Marianne bezeichnet hat!

- Der gewünschte Kurs: Er heißt „Sollwert“ (so wie es sein soll);
- Der Kapitän: Entsprechend seiner führenden Rolle, mit der er den Kurs vorgibt, wird er als „Sollwertgeber“ bezeichnet;
- Der Steermann: Seine Funktion als „Regler“ haben wir besprochen;
- Die Information über den aktuellen Kurs wird „Istwert“ genannt (so wie es ist);
- Kompass und andere Navigationsgeräte stellen die „Messfühler“ dar, sie „stecken“ in der Grafik wie ein eingestochenes Thermometer in der
- „Regelgröße“. Achtung: Hier liegt eine sprachliche Stolperfalle: Die Regelgröße regelt nicht (so wie der Messfühler misst oder die Störgröße stört), vielmehr wird sie geregelt, weshalb auch oft der zwar etwas umständlichere, aber besser verständliche Ausdruck „geregelte Größe“ verwendet wird;

- g. Wind und Strömung: Auch sie „tauchen“ grafisch in die Regelgröße ein, der allgemeine Begriff „Störgröße“ ist wohl unmissverständlich;
- h. Fragen Sie mich bitte nicht, weshalb das entgegengesetzt wirkende „Stellglied“ nicht Stellgröße heißt, dennoch: durch ihre Wirkung wird der gestörte Zustand (falscher Kurs) wieder hergestellt.
- i. die Befehle des Steuermannes hatten wir schon als „negative Rückkopplung“ kennen gelernt.

Hier alle Elemente im Zusammenhang:



5. Vom Schiff zurück zur Schilddrüse

5.1. Der „Regel“mann

Nach dem Ausflug in die christliche Seefahrt zurück zu den Hormonen:

Auch die Hormone der Schilddrüse werden „geregelt“:

Die Kommandobrücke liegt naheliegenderweise im Gehirn: der Steuermann ist die Gehirnanhangdrüse oder *Hypophyse*. In der Übersichtsgrafik in Teil 1 dieses Themas ist sie eingetragen, aber optisch kaum erkennbar: für diese Hormondrüse gilt „klein aber fein“. Nur erbsengroß, mit einem Gewicht von 0,5 g gilt sie als „Königin der Hormondrüsen“. Mit ihren Hormonen „regiert“ sie andere Hormondrüsen. In unserem Fall ist es das *Thyreotropin* (*thyreotropes Hormon* oder *Thyreoida-stimulierendes Hormon*) abgekürzt *TSH*, das als negativer Rückkopplungsbefehl die Schilddrüse zur Absonderung ihrer Hormone anregt. Der Wortteil *-trop* ist vom gr. *τρόπος tropos* 'Wendung, Richtung' abgeleitet: „glandotrope“ oder kurz „trope“ Hormone sind von einer Hormondrüse (*glandula* lat. 'Drüse') auf eine andere gerichtet.

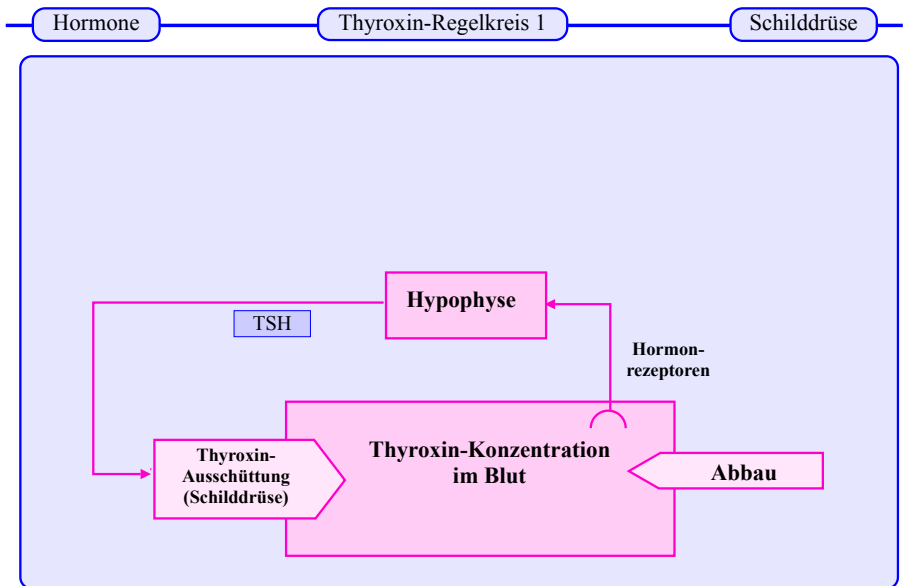
5.2. Der Kurs des Schiffes

Während in vielen anderen Fällen hormoneller Steuerungen Körperfunktionen, also Funktionsabläufe die geregelte Größe sind, wird im Schilddrüsenregelkreis die Konzentration der im Blut zirkulierenden Hormone „auf Kurs“ gehalten. Die Strategie ist wieder trickreich ausgedacht: das Ziel eines konstanten Grundumsatzes (s.o.) wird über eine konstante Menge desjenigen Hormons erreicht, das in den Zellen diesen Energieumsatz steuert.

Die „Störgröße“ ist der stetige, aber selbst von den aktuellen Belastungen des Körpers abhängige, Abbau von T3 bzw. T4, die dadurch hervorgerufenen Verluste werden durch entsprechende Ausschüttungsmengen ausgeglichen.

Als „Kompass“ dienen der Hypophyse Rezeptoren an ihren Zellen, die Thyroxin an sich binden. Aus ihrem Beladungsgrad erkennt der „Steuermann“, wie hoch die Hormonkonzentration im Blut ist. (Sie können das mit den Messstreifen vergleichen, mit deren Hilfe z.B. Diabetiker die Blutzuckerkonzentration bestimmen können.)

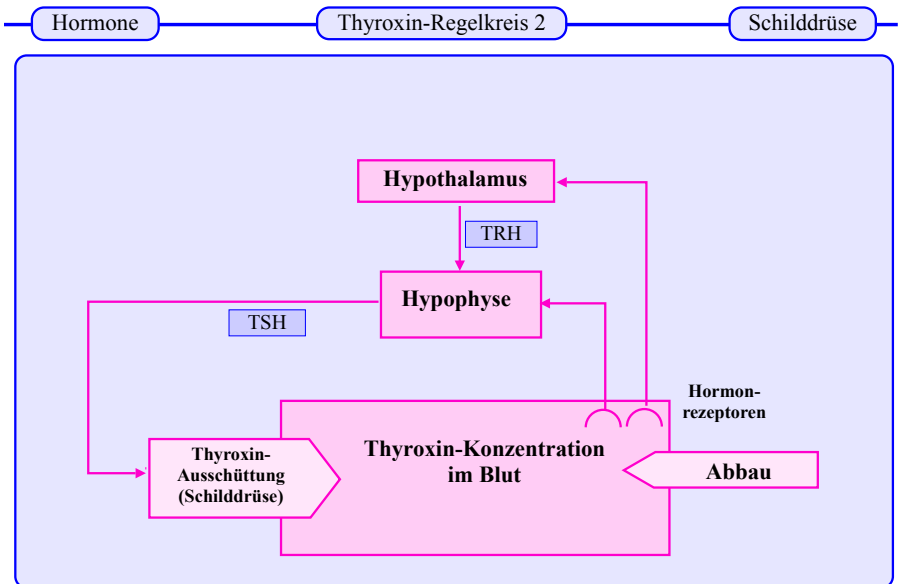
Mit diesen Funktionen können wir das Grundschema des Schilddrüsen-Regelkreises entwerfen:



5.3. Der Kapitän

Die Hypophyse ist zwar die „Königin“ der Hormondrüse, aber sie ist keine unabhängig regierende Monarchin. Sie ist selbst eingebunden ein Kommunikationssystem, das die beiden großen Steuerungssysteme unseres Körpers, Nerven- und Hormonsystem, miteinander verbindet und ihre Tätigkeiten koordiniert. Das Bindeglied zum übrigen Gehirn ist ein Teil des Zwischenhirns, der *Hypothalamus*. Er ist selbst eine Art Zwitter, da er einerseits selbst aus Nervengewebe besteht und damit zellulär ein Gehirnteil ist, er aber andererseits auch Hormone oder hormonähnliche Stoffe ausschleidet. Dazu zählt das für unser Problem wichtige *TRH* (*Thyreoliberin*, auch *Thyreotropin Releasing Hormon*). Die Hormone des Hypothalamus werden „*Liberine*“ ('Befreier, Freisetzer') oder *Releasing-Hormone* genannt (*release* engl. 'freisetzen, freilassen'), da sie die Freisetzung von Hormonen in „untergeordneten Dienststellen“) bewirken.

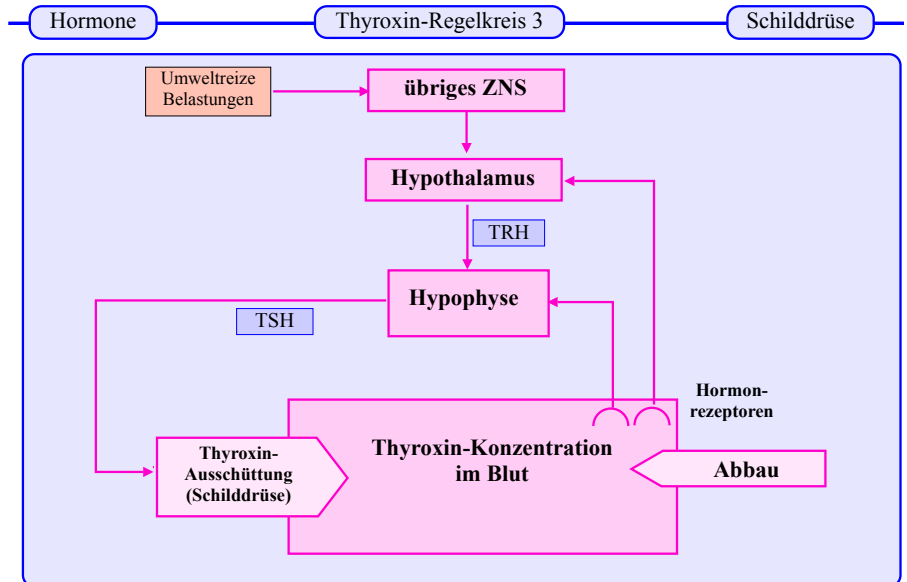
Auch ein Kontrollsystem ist eingebaut: über eigene Thyroxin-Rezeptoren misst der Hypothalamus die Thyroxinkonzentration im Blut und überprüft damit, ob seine Befehle auch ordnungsgemäß ausgeführt wurden.



6. Das große Ziel

6.1. Das „Fenster nach draußen“

Bisher bewegten wir uns immer noch im körperinternen Bereich. Entscheidend für den Organismus als Ganzes ist jedoch die Abstimmung auf Einflüsse von außen. Auch hier ist das Regelkreisprinzip erkennbar: Ziel ist die Aufrechterhaltung der inneren Vorgänge, die ständig durch Umwelteinflüsse („äußere Winde und Strömungen“) gestört werden. Dazu muss der bisher entwickelte Regelmechanismus mit der Umwelt verknüpft werden. Der Hypothalamus steht daher in Verbindung mit allen anderen Gehirnteilen, die ihrerseits über unsere Sinnesorgane „Messfühler“ in die Umwelt stecken. Sie bilden für das selbst nach außen hin abgeschlossene Hormonsystem „ein Fenster nach draußen“. So kann sich der innere Steuerungsapparat schnell, oft schon auf sich anbahnende Veränderungen, einstellen.



6.2. Ein Ausflug in die Antike

Hormone

Alkmaion von Kroton

Homöostase



**Croton
(Calabria)**



**Hera-Tempel
im antiken Croton**

Alkmaion von Kroton
griechischer Arzt und Philosoph
* um 570 im damaligen Kroton,
† um 500 v. Chr.

Wie so oft, hat auch hier ein Denker der Antike das grundlegende Prinzip (wenn auch ohne Kenntnisse der inneren Mechanismen) richtig erkannt. Das heutige Ort *Croton* in Süditalien war die Heimatstadt des griechischen Arztes und Philosophen *Alkmaion von Kroton* (* um 570 im damaligen Kroton, † um 500 v. Chr.). Seine Hauptgedanken waren:

Hauptgedanken des Alkmaion von Kroton:

- a. Der menschliche Körper ist ein Mikrokosmos, in dem sich der Makrokosmos widerspiegelt.
- b. Das Gehirn ist das zentrale Organ der Wahrnehmung und des Denkens.
- c. Der Unterschied zwischen Mensch und Tier besteht in der Fähigkeit des Menschens, Wahrgenommenes zu begreifen.
- d. Gesundheit ist ein Gleichgewicht der inneren Zustände und der äußeren Einflüsse, Krankheiten haben ihre Ursache in einem Ungleichgewicht.

6.3. Der Balanceakt des Lebens

Für das Verständnis des Hormonsystems ist besonders der letzte Gedanke bedeutsam. Er gibt eine Vorstellung wieder, die im 19. Jh. entwickelt (bzw. eigentlich wiederentdeckt wurde) und unter dem Begriff „*Homöostase*“ in die Wissenschaft eingeführt wurde. Das Wort ist aus den griechischen Wörtern ὁμοίος *homois* 'gleich' und στάσις *stasis* '(Zu-)Stand, Lage' zusammengesetzt. Damit soll ein (innerer) Gleichgewichtszustand beschrieben werden, den Lebewesen (oder allgemein offene, dynamische Systeme) entgegen äußeren, störenden Einflüssen aufrecht erhalten. Wir können hier an die Betrachtung von Lebewesen bzw. Ökosystemen im Beitrag „Ökologie II“ anknüpfen: Lebewesen haben wir dort als offene Systeme im Fließgleichgewicht beschrieben und festgestellt, dass sie trotz ständiger Aufnahme und Abgabe von Stoffen und Energie eine gleichbleibende Menge von Stoffen bzw. Energie enthalten. Im Gegensatz zu einem „statischen“ Gleichgewicht (wie z.B. ein Kräftegleichgewicht in der Mechanik) bezeichnet man solche Gleichgewichte als „dynamisch“. (Im Beitrag „Ca-Kreislauf“ sind uns mit den Gleichgewichtsreaktionen ebenfalls schon „dynamische“ Gleichgewichte begegnet.)

Homöostase

Gleichgewichtszustand im Inneren eines Lebewesens
(allgemein eines offenen, dynamischen Systems).

Aufrecht erhalten durch Regelungsvorgänge zum Ausgleich von Störungen.

Der Mechanismus des Regelkreises ist also die „Technik“, mit der das Ziel der Homöostase erreicht wird.

Allgemein sollte man sich dabei auch den ersten Gedanken des *Alkmaion* vor Augen halten: Alle Lebewesen, angefangen von einem Einzeller bis zu komplexen Großstrukturen wie der menschliche Körper, bewahren durch Abgrenzungen nach außen (die aber nie völlig dicht sein dürfen, sondern eine sinnvoll ausgewogene Durchlässigkeit besitzen) in sich eine kleine Homöostase-Welt. Sie erreichen dies (man könnte fast sagen: diesen inneren Zustand der Glückseligkeit) durch ein raffiniert ausgeklügeltes Netzwerk von Regelkreisen.

Ich möchte es Ihrer eigene Phantasie überlassen, für welche Bereiche unserer menschlichen Gemeinschaft wir davon viel lernen könnten (oder umgekehrt gesehen: Über welche dieser Bereiche würde schon ein Pantoffeltierchen, könnte es unsere oft kläglichen Versuche eines inneren Gleichgewichtes sehen, nur mitleidig den Kopf schütteln!)

Fachbegriffe

(glando-)trophe Hormone

Hormone, die andere Hormondrüsen beeinflussen; ausgeschüttet vom Hypophysenvorderlappen*

B: Adrenocorticotropes Hormon ACTH, Thyreotropin (thyreotropes Hormon, Thyreoidea-stimulierendes Hormon, TSH)

glandula lat. 'Drüse', gr. *tropos* τρόπος Richtung

Homöostase

Gleichgewichtszustand im Inneren eines Lebewesens

(allgemein eines offenen, dynamischen Systems);

aufrecht erhalten durch Regelung*svorgänge zum Ausgleich von Störungen.

gr. *homoios* ὁμοῖος gleich; *στάσις stasis* '(Zu-)Stand, Lage'

Hypophyse (Hirnanhangsdrüse)

Neurosekretorische Drüse am Boden des Zwischenhirns (Hypothalamus*), wirkt als übergeordnete Drüse auf andere Hormondrüsen.

gr. *hypo* ὑπό unter, *physis* φύσις Blase

Hypothalamus

Teil des Zwischenhirns; Regelzentrum für vegetative Funktionen (Temperatur); steuert durch Releasing-Hormone* die Hypophyse* (Kontaktstelle ZNS-Hormonsystem)

gr. *hypo* ὑπό unter, *thalamos* θάλαμος Höhle (Zwischenhirnhohlraum!)

Kybernetik

Wissenschaft von der Steuerung und Regelung (Maschinen, Organismen, soziale Strukturen)

engl. *cybernetics* aus gr. κυβερνήτης *kybernetes* 'Steuermann'.

Regelung

Steuerung*, bei der die zur Steuerung notwendige Information* aus der Beobachtung der Wirkung des Steuerungsvorganges abgeleitet wird. (Steuerung mit negativer Rückkopplung*).

lat. *regula* Maßstab, Regel; fr. *régulier*

Releasing-Hormone (*releasing factors*, *Liberine*)

Botenstoffe, die im Hypothalamus* gebildet, über Blutgefäße in die Hypophyse* transportiert werden und dort die Ausschüttung von Hormonen* bewirken; wegen ihrer Herkunft auch als Neurohormone bezeichnet.

B: *Thyreoliberin*, *Thyreotropin Releasing Hormon TRH*

engl. *release* freilassen, lat. *liberare* 'befreien'

Rückkopplung

Rückwirkung einer Ausgangsgröße („Ergebnis“) auf den Eingang eines Systems.

- positive R.: eine Steigerung der Eingangsgröße bewirkt eine Verstärkung der Ausgangsgröße („Aufschaukeln“)
- negative R.: eine Steigerung der Eingangsgröße bewirkt eine Hemmung der Ausgangsgröße (wichtig für die Regelung*)

Schlüssel-Schloss-Prinzip

Häufig in der Natur auftretendes Prinzip der spezifischen Passung zweier Strukturen, dient der gegenseitigen Erkennung.

B: Hormon/Rezeptor, Enzym/Substrat, Kopulationsorgane

Steuerung

Beeinflussung eines Materie- oder Energiestromes durch eine Information.

≠ Regelung*

Thyreotropin

(thyreotropes Hormon, Thyreoidea-stimulierendes Hormon, TSH)

Glandotropes* Hormon der Hypophyse*; regt die Schilddrüse zur Absonderung ihrer Hormone an.

von *Thyreidea* (Schilddrüse) aus gr. *thyreos* θυρεός Schild; -*trop* gr. *τρόπος* *tropos* 'Wendung, Richtung'