E. W. Zerbst

Bionik

Biologische Funktionsprinzipien und ihre technischen Anwendungen



Teubner Studienbücher
Biologie

ISBN 3-519-03607-X

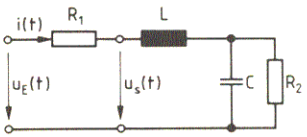
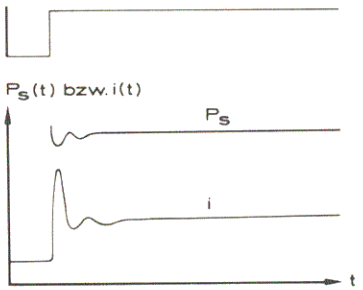


Abb. 3.3 Ersatzschaltung für einen isoliert durchströmten Abschnitt eines tierischen Blutgefäßes



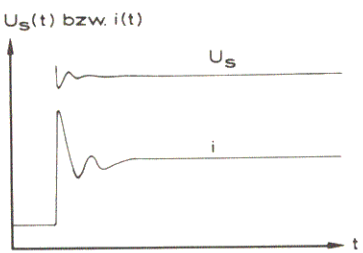


Abb. 3.4
Sprungantwort des Blutstromes bzw. des elektrischen Stroms und des Blutdruckes bzw. der elektrischen Spannung bei Applikation eines Druck- bzw. Spannungs-Stoßes auf einen isolierten Blutgefäßabschnitt bzw. eine elektrische Ersatzschaltung desselben (nach Zerbst (1965))

Dieses stark vereinfachte Modell veranschaulicht, wie sich die Einschwingprozesse von Blutdruck und Blutstrom allein aus passiven Eigenschaften: Elastizität der Blutgefäßwand, Volumen und Massenträgheit der Blutsäule im Gefäß erklären. Darüber hinaus kann man an solchen Modellen aber auch Veränderungen von Randbedingungen mit ihrem Einfluß auf das „Stoß-Einschwingverhalten" simulieren, so z.B. Veränderungen der Dehnbarkeit der Gefäßwand durch Pharmaka oder nach Stimulation oder Ausschaltung der die Wandmuskulatur versorgenden Nerven. Vergrößert man dabei z.B. am Analogmodell die elektrische Kapazität (Dehnbarkeit), dann fehlt in der simulierten Blutstromkurve die unterschwingende Komponente, wie das auch am biologischen Objekt der Fall ist.

Elektrische Ersatzschaltungen, aber auch Analogrechner und entsprechend programmierte digitale Rechenanlagen (erhöhter Aufwand) können so zu energetisch analogen Modellanalysen herangezogen werden. Solche Prozesse lassen sich auch in die Form von Transportgleichungen der Thermodynamik irreversibler Prozesse umsetzen. (Das Ohmsche Gesetz ist z.B. eine solche Transportgleichung.)

3.1.2 Zustandsraummodelle – Axiomatisches Systemmodell

Zur Vorbereitung bionischer Problemlösungen können biologische Vorgänge mit einer sehr großen Anzahl verschiedener Modellmethoden abgebildet werden (vgl. auch: Röhler, R.: Biologische Kybernetik). Ein Nachteil vieler systemtheoretischer Modellansätze gerade bei der Anwendung in der Bionik besteht darin, daß die energetischen und/oder

Wirkungsbeziehungen der Objekt-Innenstrukturen nicht ausreichend berücksichtigt werden, so z.B. bei „black-box"-Anlagen. Gerade aber diese Innenstrukturen sind das Objekt bionischer Untersuchungen. Aus diesem Grunde soll hier nochmals an der einfachen, elektrischen Ersatzschaltung der Abb. 3.3 modifiziert in Abb. 3.5 gezeigt werden, wie die allgemeinen (und verallgemeinerten) Grundeigenschaften thermodynamisch offener, durch externe Auslöseprozesse „erregbarer", biologischer Systeme axiomatisch behandelt werden können.

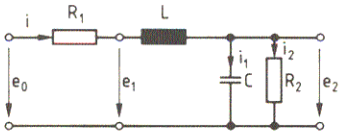


Abb. 3.5
Ersatzschaltung für die axiomatische Behandlung der verallgemeinerten Grundeigenschaften thermodynamisch offener biologischer Systeme

Biologische Systeme kann man analysieren, wenn:

(1) von außen (z.B. im Sinne einer Impulsfunktion) Energie zugeführt wird im Sinne einer allgemeinen, energetischen Anregung,

(2) von außen Energie in ein spezielles, inneres Energiereservoir zugeführt wird,

(3) durch geringe äußere, energetische Einwirkung auf das System (z.B. Lichtquanteneinwirkung auf Photorezeptoren) die Freisetzung vergleichsweise sehr großer Energiemengen aus inneren Depots ausgelöst wird.

Zur formalen Illustration wird hier ein Reihenschwingkreis nach Abb. 3.5 als Ersatzschaltbild eines beliebigen, biologischen Systems betrachtet. Diese Schaltung sei vor Beginn der Untersuchung und Analyse energielos.

In dieser Anordnung wird zum Zeitpunkt t_0 der Schalter am Eingang geschlossen, so daß es zur Energiezufuhr aus einem Generator kommt. Gesucht ist der zeitliche Verlauf der Größe e_2 (t).

Die Potentiale (e) und die Flüsse (i) werden durch folgende Gleichungen beschrieben:

(1) $e_0 = R_1 i + e_1$

(2) $e_1 = L\dot{i} + e_2$

(3) $i_1 = C\dot{e}_2$

(4) $i_2 = \dfrac{e_2}{R_2}$

(5) $i = i_1 + i_2$

Das System besitzt Eingangsvariable, Zustandsvariable und Ausgangsvariable.

(6) Eingangsvariable: $x_1 = e_0$

(7) Zustandsvariable: $u_1 = i$

(8) $u_2 = e_2$

(9) Ausgangsvariable: $y_1 = e_1$

Jedem lin. unabhängigen Energiespeicher ist eine Zustandsvariable zugeordnet.

Aus Gl. (1) und (2) ergibt sich durch Einführen der Variablen aus Gl. (6), (7) und (8) die Gl.

$$(10) \qquad \dot{u}_1 = -\frac{R_1}{L} u_1 - \frac{1}{L} u_2 + \frac{1}{L} x_1 \qquad \left(\dot{u}_1 = \frac{du_1}{dt}\right)$$

Ebenso ergibt sich aus Gl. (3), (4) und (5) durch Einführen von Gl. (7) und (8)

$$(11) \qquad \dot{u}_2 = \frac{1}{C} u_1 - \frac{1}{R_2 C} u_2$$

Aus Gl. (1) und Einführung von (6), (7) und (9) ergibt sich

$$(12) \qquad y_1 = -R_1 u_1 + x_1$$

Die Gl. (10) – (12) lassen sich in einem Matrizengleichungspaar zusammenfassen:

$$(13) \qquad \dot{\mathbf{u}}(t) = \mathbf{A}(t)\,\mathbf{u}(t) + \mathbf{B}(t)\,\mathbf{x}(t)$$

$$(14) \qquad \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(t)\,\mathbf{u}(t) + \mathbf{D}(t)\,\mathbf{x}(t)$$

Darin bedeuteten allgemein:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_q(t) \end{bmatrix} \qquad \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_n(t) \end{bmatrix} \qquad \mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_p(t) \end{bmatrix}$$

Eingangsvektor Zustandsvektor Ausgangsvektor

Beim Eingangsvektor bedeutet q die Anzahl der Eingangsgrößen, beim Zustandsvektor bedeutet n die Anzahl der linear unabhängigen Energiespeicher im System, da man üblicherweise jedem solchen Energiespeicher eine Zustandsvariable zuordnet, und beim Ausgangsvektor bedeutet p die Anzahl der Ausgangsgrößen.

Beispiel:

Eingangsvektor:	Zustandsvektor:	Ausgangsvektor:
q = 1	n = 2	p = 1
also:	also:	also:
(15) $\mathbf{x}(t) = [x_1(t)]$	(16) $\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix}$	(17) $\mathbf{y}(t) = [y_1(t)]$

Die Gleichung (13) beschreibt den zukünftigen Systemzustand.

A (t) = System-Matrix:	Diese quadratische Matrix (Ordnung: n · n) bestimmt die innere Dynamik des Systems.
B (t) = Eingangsmatrix:	beschreibt die Art der Ansteuerung/Erregung des Systems (Ordnung: n · q)

Die Gleichung (14) beschreibt die Abhängigkeit der Systemausgänge von den Zustandsvariablen und Eingangsgrößen.

C (t) = Ausgangsmatrix: Diese Matrix (Ordnung: $p \cdot n$) beschreibt den Einfluß der Zustandsvariablen auf die Ausgangsgrößen des Systems.

D (t) = Durchgangsmatrix: Diese Matrix ($p \cdot q$) zeigt, wie Eingangsgrößen ohne Energiespeicherung auf die Ausgangsgrößen direkt einwirken.

Damit läßt sich ein lineares und kontinuierliches System in der Natur eindeutig beschreiben. (Bei nichtlinearen Systemen müssen Gl. (13) und (14) um entsprechende Terme für die Nichtlinearität entsprechend erweitert werden.)

Für das konkrete Beispiel der elektrischen Ersatzschaltung gelten die folgenden Matrizen:

Systemmatrix:

$$(18) \qquad A(t) = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_2 C} \end{bmatrix}$$

Eingangsmatrix:

$$(19) \qquad B(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{(hier nur ein Spaltenvektor)}$$

Ausgangsmatrix:

$$(20) \qquad C(t) = [-R_1 \quad 0] \quad \text{(hier nur ein Zeilenvektor)}$$

Durchgangsmatrix:

$$(21) \qquad D(t) = [1]$$

Komplett ausgeschrieben: (13) + (14)

$$(22) \qquad \begin{bmatrix} \dot{u}_1(t) \\ \dot{u}_2(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_2 C} \end{bmatrix}}_{A(t)} \cdot \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}}_{B(t)} \cdot [x_1(t)]$$

$$(23) \qquad y_1(t) = \underbrace{[-R_1 \qquad 0]}_{\mathbf{C}(t)} \cdot \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} + \underbrace{[1]}_{\mathbf{D}(t)} \cdot [x_1(t)]$$

Die hier an einem Beispiel gezeigte Betrachtungsweise steht im Gegensatz zu der meist üblichen Art der Betrachtung von Systemen im Sinne der „black-box"-Analyse. Dabei interessiert lediglich das reine Übertragungsverhalten (an den Klemmen des Vierpols). Die alleinige Untersuchung derartiger „empirischer Systemmodelle" befriedigt nicht, wenn ein biologisches Objekt bionisch auszuwerten ist. Hierbei will man wissen:

1. Welche energetischen Grundeigenschaften bestimmen den biologischen Vorgang?
2. Welche energetisch-strukturellen Eigenschaften hat das System, an dem ein Vorgang ausgewertet werden soll?
3. Welche Wechselbeziehungen bestehen zwischen den inneren Elementen des Systems? Wie bestimmen diese Wechselbeziehungen das Übertragungsverhalten (z.B. an Nervenzellen) von Signalen an Eingang und Ausgang?
4. Wie läßt sich sowohl das System als auch seine intern ablaufenden und extern bedingenden oder auslösenden Prozesse energetisch und strukturgerecht mit einem möglichst einfachen, aber analogen Modell abbilden? Dieses Modell soll bionischer Ausgangspunkt für die technische Anwendung des betrachteten, biologischen Prototyps oder -prinzips sein, wie läßt es sich daher auch für den technischen Kooperationspartner verständlich formulieren?

Alle diese Forderungen können Modelle der eben exemplarisch beschriebenen Art erfüllen, wenn sie zusätzlich noch mit ihren internen Wechselbeziehungen durch graphenmethodische Beschreibungen verdeutlicht werden.

Berücksichtigt man den oben ausgeführten Punkt 4, dann wird deutlich, daß die Mathematisierung in diesem Falle eine praktische und anwendungsorientierte Aufgabe zu erfüllen hat. Es geht also nicht darum, wie das heute leider häufig der Fall ist, Fakten mathematisch „ästhetisch" zu verkleiden, ohne daß dabei ein wesentlicher, heuristischer Gewinn erzielt wird.

3.2 Biologische Netzwerke – Graphentheoretische Methodik

Elektrische Netzwerke unterschiedlicherer Art, wie Radiogeräte, Taschenrechner und Großrechenanlagen, müssen hinsichtlich ihrer Funktion keine Gemeinsamkeiten haben. Dennoch zeigt es sich, daß sie aus relativ gleichartigen Elementen aufgebaut sind: z.B. aus Stromquellen, Leitern, Transistoren, Widerständen, Kondensatoren etc. Die Schaltanordnung, die Struktur oder die funktionelle Organisation entscheidet darüber, welche Eigenschaften diese Systeme haben.

Biologische Systeme (Zellen, Organe, Organismen, Biotope) unterschiedlicher Art müssen (wie die elektrischen Netzwerke) hinsichtlich ihrer speziellen Leistungen oder

Lebensäußerungen keine Gemeinsamkeiten haben. Dennoch zeigt es sich auch hier, daß man relativ gleichartige, energetische und strukturelle Prinzipien feststellen kann: z.B. Resorption, Exkretion, bioelektrische Erregungsübertragung, Stoffwechselprinzipien der Glykolyse, der Atmungskettenphosphorylierung, ATP als gemeinsamer Energieträger etc. Die biologischen Strukturen, ihre Organisation und die funktionelle Verknüpfung ihrer elementaren Leistungen untereinander entscheiden darüber, durch welche Eigenschaften die jeweiligen Organismen ausgezeichnet sind.

Sowohl technische als auch biologische Systeme lassen sich durch die Darstellung der Verknüpfung funktioneller und morphologischer Grundeigenschaften im jeweiligen Netz der Wirkungsbeziehungen charakterisieren. Solche Grundeigenschaften lassen sich weiter spezialisieren, so z.B. die Grundfunktion „Aufnahme von Materie und Energie" spezialisiert in die Funktionen „Absorption von Baustoffen und Wasser", „Absorption energetisch nutzbarer Substanz" und „Absorption von Strahlungsenergie". Auf gleiche Weise können Grundfunktionen der Reizbarkeit und Erregungsbildung etc. spezialisiert werden.

Die Verknüpfung solcher Grund- und Spezialfunktionen in räumlicher, zeitlicher und bedingungsmäßiger Hinsicht kann mit Hilfe der graphentheoretischen Methode erfolgen. Es wird damit die Herstellung eines „Modelles" zum Netz der Wirkungsbeziehungen eines Systems möglich. Diese Netz-Struktur kennzeichnet die Art der Anordnung und der Verknüpfung seiner Elemente. Dabei kann es ohne Belang sein, welche energetischen und morphologischen Fakten die Elemente charakterisieren. Es interessiert nur die Gesamtheit der zwischen ihnen bestehenden Relationen. Dies bedeutet: als Gesamtheit von Relationen ist die Struktur eines Systems durch den definierten Zusammenhang zwischen den Elementen bestimmt. Dieses gilt in analoger Weise für den technischen Schaltplan z.B. eines elektronischen Gerätes. Seine „Struktur" ist durch den Schaltplan gegeben. Nun sind in einem solchen Schaltplan die Wirkungsbeziehungen zwischen den elektronischen Bauelementen gewöhnlich nicht durch Pfeilsymbole eingezeichnet. Der Spezialist kann sie aber – falls das System nicht zu komplex aufgebaut ist – heraus „lesen".

Die Bionik ist (z.B. auch im Falle der „Organisationsbionik") an der Untersuchung elementarer Relationsketten, -netze oder -gefüge der biologischen Prototypen interessiert. Welche Darstellungsmethodik zur Mitteilung von Wirkungsgefügen kann dabei im interdisziplinären Gespräch zwischen Biologen und Technikern beitragen?

Eine solche Darstellung ist besonders deshalb wichtig, weil in biologischen Systemen der Zusammenhang zwischen Elementen notwendig oder zufällig, allgemein oder einmalig, wesentlich oder unwesentlich sein kann. Dieses zu erkennen, muß weder für den Biologen noch für den Techniker immer leicht sein.

Die Mathematik stellt gewisse Elemente der Graphentheorie und der Theorie der Kategorien zur Verfügung, die besonders geeignet sind, um die Strukturen biologischer Systeme darzustellen, formal zu beschreiben und zu untersuchen. Grundlage für beide Theorien sind Begriffe der Menge, der Relation und der Abbildung.

Der Leser muß Informationen zu diesen Theorien aus der Fachliteratur entnehmen, da hier der Raum eines Kapitels nicht einmal zur allgemeinen Darstellung des Prinzips der

Methoden ausreicht. Zur Illustration soll jedoch auf das Beispiel in Abschn. 3.1.1 und 3.1.2 Bezug genommen werden: Ein Abschnitt aus dem Adersystem des Blutkreislaufs wurde dort im Hinblick auf seine energetischen, funktionellen und dynamischen Antworteigenschaften in das Modell einer elektrischen Ersatzschaltung gebracht und formal am axiomatischen Systemmodell analysiert. Dort wurde ausgeführt, daß die internen Wechselbeziehungen des axiomatischen Modelles graphentheoretisch verdeutlicht werden können. Dies soll im folgenden geschehen. Ein didaktischer Vorteil liegt dabei darin, zu zeigen, wie an ein und demselben Objekt die verschiedenen – bionisch wichtigen – Abstraktions- und Analysemethoden Auskunft über (a) energetische, (b) dynamisch-funktionelle und (c) relationale Eigenschaften geben können.

Die energetischen und dynamischen Beziehungen, die das Einschwingverhalten von Blutstrom und Blutdruck eines isolierten Blutgefäßabschnittes bestimmen, wurden

(1) durch die analogen Schaltelemente in der Ersatzschaltung (Widerstand = Gefäßwiderstand, Strom = Blutstrom, Spannung = Blutdruck, Induktivität = Massenträgheit, Kapazität = Dehnbarkeit etc.)
und

(2) durch den Satz von Variablen, Vektoren und Matrizen für System, Eingang, Zustand, Durchgang und Ausgang im axiomatisch-mathematisch analysierten, gleichen System

untersucht. Nun lassen sich die relationalen Verknüpfungen der Systemelemente weiter illustrieren, wenn man graphenmethodisch den „Veranschaulichungsbereich der jeweiligen Matrizen" abbildet. Das ist in Abb. 3.6 geschehen.

Der interessierte Leser kann sich von dieser Darstellung in Verbindung mit der mathematischen Analyse des axiomatischen Systemmodelles selbst einen „Einstieg" in die Prinzipien der Graphentheorie schaffen.

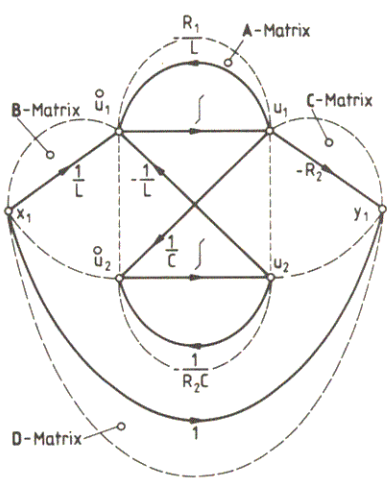


Abb. 3.6
Graphentheoretische Darstellung des axiomatischen Systemmodelles