

Heidelberger Taschenbücher Band 182



Dezső Varjú

# Systemtheorie

für Biologen und Mediziner

Mit 80 Abbildungen

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York 1977

Professor Dr. D. VARJÚ  
Lehrstuhl für Biokybernetik  
Institut für Biologie II  
Universität Tübingen

ISBN-13: 978-3-540-08086-2 e-ISBN-13: 978-3-642-66567-7  
DOI: 10.1007/978-3-642-66567-7

Library of Congress Cataloging in Publication Data. Varjú, D. 1932-. Systemtheorie für Biologen und Mediziner. (Heidelberger Taschenbücher; Bd. 182) Bibliography: p. 1. Biology-Methodology. 2. Biological models. 3. System analysis. I. Title. [DNL.M: 1. Mathematics. 2. System analysis. 3. Biology. 4. Medicine. QA402 V313s] QH323.5.V37 574'.01'84 76-30731.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© by Springer-Verlag Berlin · Heidelberg 1977.

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1977

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gesamtherstellung: Zehnersche Buchdruckerei, Speyer  
2131|3130-543210

## Vorwort

Der Einzug der Chemie, der Physik und neuerdings auch der Mathematik in verschiedene Teilbereiche der Biologie brachte für den Forscher, Lehrer und Studenten Probleme mit sich, für deren Lösung der richtige Weg noch nicht gefunden wurde: Das Erlernen der methodischen Hilfswissenschaften entspricht nahezu einem Zweitstudium, das in unserer Zeit – auch angesichts der überfüllten Hochschulen und der Regelstudienzeit – nur von wenigen absolviert werden kann. Nach meinen Erfahrungen bereitet den meisten Biologen die Aneignung der mathematischen Hilfsmittel die größten Schwierigkeiten. Nur wenige Biologiestudenten erhalten auch heute während des Studiums eine gründliche und problemorientierte Einführung in die höhere Mathematik. Selbst für diese reichen die Vorkenntnisse zum Erlernen derjenigen Abschnitte der angewandten Mathematik während und nach dem Studium nicht mehr aus, um spezielle biologische Probleme lösen zu können.

Diejenigen mathematischen Methoden, die in der Biologie überall dort benutzt werden können, wo Reiz-Reaktions-Beziehungen im weitesten Sinn analysiert und die Ergebnisse quantitativ in Form eines mathematischen Modells dargestellt werden sollten, sind unter dem Überbegriff „Systemtheorie“ bekannt. Diese wird vorwiegend im Bereich der Ingenieurmathematik gepflegt, unbeschadet der Tatsache, daß sich auch eine „mathematische Systemtheorie“ rapide entwickelt.

Aufgabe dieses Textes ist es, Biologen und Medizinern sowie Studierenden der Biologie und Medizin die Möglichkeit zu bieten, grundlegende Kenntnisse auf dem Gebiet der Systemtheorie im Sinne der Ingenieurmathematik zu erwerben. Voraussetzung sind nur bescheidene Vorkenntnisse in der höheren Mathematik, d. h., es wird lediglich erwartet, daß der Leser die Grundbegriffe der Differential- und Integralrechnung und die Schulmathematik beherrscht, sowie elementare Kenntnisse in der Experimentalphysik, insbesondere in der Elektrizitätslehre besitzt. Im Schriftenverzeichnis werden einige Werke genannt [1, 2, 3], die sich zum Erlernen oder zum Auffrischen dieser Grundlagen eignen. Überall dort, wo es nur möglich erschien, wurde zugunsten der Anschaulichkeit – die Mathematiker mögen es mir verzeihen – auf mathematische Exaktheit verzichtet. Der induktive Charakter der Darstellung hat die Aufgabe – zugegeben, zu Lasten der Eleganz – den Leser Schritt für Schritt von einfachen, möglicherweise bereits bekannten Problemen an komplexe

Sachverhalte heranzuführen. Es kommt dabei der selbständigen Lösung der Übungsbeispiele eine besondere Bedeutung zu.

Nach Studium des Textes sollte der Leser in der Lage sein, einen großen Teil der Veröffentlichungen, in denen von der Systemtheorie Gebrauch gemacht wird, lesen zu können. Für die eigenständige Anwendung der Theorie wird in den meisten Fällen das Zurückgreifen auf die weiterführende Literatur nicht zu vermeiden sein. Ich hoffe, daß dieser Text dem Leser auch hierfür die notwendigen Grundkenntnisse vermittelt.

Der erste Teil (lineare Filtertheorie) sollte als das Alphabet der Systemtheorie gesehen werden. Hier wurde auf die Darstellung konkreter biologischer Anwendungsbeispiele verzichtet. Biologische Systeme sind von wenigen Ausnahmen abgesehen so komplex, daß die lineare Filtertheorie zu ihrer Beschreibung unmittelbar nur in sehr grober Näherung herangezogen werden kann. Die Grundbegriffe der linearen Filtertheorie sind jedoch auch für die Analyse nichtlinearer Systeme unerlässlich. Dem zweiten Teil (Nichtlineare Systeme) liegen dagegen überwiegend konkrete biologische Probleme zugrunde. Auf die eingehende Behandlung der biologischen Sachverhalte mußte freilich auch hier oft verzichtet werden, um den Umfang im gegebenen Rahmen zu halten. Interessierte Leser mögen sich der Literaturhinweise bedienen.

Der vorliegende Text geht auf eine Vorlesung zurück, die ich im Fachbereich Biologie der Universität Tübingen bereits mehrmals gehalten habe. Dieser Text war auch Grundlage eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierten Fortbildungskurses. Meine Hörer trugen mit kritischen Fragen und Vorschlägen zur ständigen inhaltlichen und didaktischen Verbesserung der Darstellung wesentlich bei. Es ist mein Wunsch, daß auch die Leser zur Beseitigung der zweifellos immer noch gegebenen Unzulänglichkeiten mit Kritik und Rat beitragen werden.

Tübingen, im März 1977

D. Varjú

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b> . . . . .	1
Reale und abstrakte Systeme . . . . .	1
Definitionen, Begriffe . . . . .	4
Ziele und Methoden . . . . .	9
Erster Teil	
<b>Theorie Linearer Filter</b> . . . . .	10
1. Passive elektrische Netzwerke mit konzentrierten Parametern . .	10
2. Nichtelektrische Systeme. Dualität elektrischer Netzwerke . .	20
2.1 Mechanische Systeme . . . . .	20
2.2 Duale Netzwerke . . . . .	24
2.3 Weitere nichtelektrische Systeme . . . . .	27
3. Allgemeine Form der Differentialgleichungen passiver Netzwerke mit konzentrierten Parametern . . . . .	27
4. Lösung linearer Differentialgleichungen erster Ordnung. Übergangsfunktion und Impulsantwort . . . . .	29
5. Das Faltungsintegral . . . . .	40
6. Rückwirkungsfrei hintereinander geschaltete Netzwerke . . . .	45
7. Die Antwort auf sinusförmige Erregung. Amplituden- und Phasenfrequenzgang . . . . .	53
8. Die Fourier-Reihe. Periodische Eingangsfunktionen . . . . .	65
9. Fourier-Integral, Fourier-Transformation . . . . .	75
10. Komplexe Schreibweise trigonometrischer Funktionen. Fourier-Reihe und Fourier-Integral im komplexen Bereich . . . .	81
11. Komplexer Frequenzgang . . . . .	89
12. Laplace-Transformation. Übertragungsfunktion . . . . .	91
13. Die Anwendung der Laplace-Transformation zur Lösung linearer Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten . .	100
13.1 Berechnung der Impulsantwort . . . . .	100
13.2 Berechnung der Stufenantwort . . . . .	110
13.3 Lineare Systeme mit Laufzeit . . . . .	112
13.4 Filter ungeradzahligter Ordnung . . . . .	114
13.5 Systeme von Differentialgleichungen . . . . .	115

13.6	Homogene Gleichungen	118
13.7	Das Matrix-Verfahren	119
14.	Die Bedeutung der Pole und Nullstellen der Übertragungsfunktion	123
15.	Die Analyse linearer Regelkreise	131
15.1	Regelung durch negative Rückkopplung	131
15.2	Berechnung der Regelgröße	134
15.3	Offener und geschlossener Regelkreis	137
15.4	Zur Stabilität linearer Regelkreise	139
15.5	Die Güte der Regelung	152
16.	Systeme mit verteilten Parametern	158
17.	Grundbegriffe der Systemtheorie regelloser Vorgänge	166
17.1	Korrelationskoeffizient	168
17.2	Korrelationsfunktionen	171
17.3	Korrelationsfunktion und Leistungsspektrum	176
17.4	Die Übertragung stationärer regelloser Vorgänge durch lineare Filter	180

## Zweiter Teil

<b>Nicht Lineare Systeme</b>	184	
18.	Statische nicht lineare Kennlinien	184
19.	Serienschaltungen linearer Filter und nicht linearer Kennlinien	194
20.	Nicht lineare Kennlinien in Systemen mit zwei Eingängen	207
21.	Dynamische Kennlinien. Rezeptormodelle	213
22.	Nicht lineare Differentialgleichungen: Analyse in der Phasenebene	225
23.	Die Hodgkin-Huxley-Gleichung der Nervenerregung	243
24.	Das Stabilitätsverhalten nicht linearer Regelkreise. (Harmonische Balance)	256
Literatur	275	
Sachverzeichnis	279	