

Editor / Herausgeber:

Prof. Salomon Klaczko-Ryndziun, Frankfurt a. M.

Co-Editors / Mitherausgeber:

Prof. Ranan Banerji, Temple University, Philadelphia
 Prof. Jerome A. Feldman, University of Rochester, Rochester
 Prof. Mohamed Abdelrahman Mansour, ETH, Zürich
 Prof. Ernst Billeter, Universität Fribourg, Fribourg
 Prof. Christof Burckhardt, EPF, Lausanne
 Prof. Ivar Ugi, Technische Universität München
 Prof. King-Sun Fu, Purdue University, West Lafayette
 Prof. Gerhard Fehl, R.W.T.H., Aachen
 Dipl.-Ing. Ekkehard Brunn, Universität, Dortmund

Interdisciplinary Systems Research Analysis – Modeling – Simulation

The system science has been developed from several scientific fields: control and communication theory, model theory and computer science. Nowadays it fulfills the requirements which Norbert Wiener formulated originally for cybernetics; and were not feasible at his time, because of insufficient development of computer science in the past.

Research and practical application of system science involve works of specialists of system science as well as of those from various fields of application. Up to now, the efficiency of this co-operation has been proved in many theoretical and practical works.

The series 'Interdisciplinary Systems Research' is intended to be a source of information for university students and scientists involved in theoretical and applied systems research. The reader shall be informed about the most advanced state of the art in research, application, lecturing and metatheoretical criticism in this area. It is also intended to enlarge this area by including diverse mathematical modeling procedures developed in many decades for the description and optimization of systems.

In contrast to the former tradition, which restricted the theoretical control and computer science to mathematicians, physicists and engineers, the present series emphasizes the interdisciplinarity which system science has reached until now, and which tends to expand. City and regional planners, psychologists, physiologists, economists, ecologists, food scientists, sociologists, political scientists, lawyers, pedagogues, philologists, managers, diplomats, military scientists and other specialists are increasingly confronted or even charged with problems of system science.

The ISR series will contain research reports – including PhD-theses – lecture notes, readers for lectures and proceedings of scientific symposia. The use of less expensive printing methods is provided to assure that the authors' results may be offered for discussion in the shortest time to a broad, interested community. In order to assure the reproducibility of the published results the coding lists of the used programs should be included in reports about computer simulation.

The international character of this series is intended to be accomplished by including reports in German, English and French, both from universities and research centers in the whole world. To assure this goal, the editors' board will be composed of representatives of the different countries and areas of interest.

Interdisziplinäre Systemforschung Analyse – Formalisierung – Simulation

Die Systemwissenschaft hat sich aus der Verbindung mehrerer Wissenschaftszweige entwickelt: der Regelungs- und Steuerungstheorie, der Kommunikationswissenschaft, der Modelltheorie und der Informatik. Sie erfüllt heute das Programm, das Norbert Wiener mit seiner Definition von Kybernetik ursprünglich vorgelegt hat und dessen Durchführung zu seiner Zeit durch die noch ungenügend entwickelte Computerwissenschaft stark eingeschränkt war.

Die Forschung und die praktische Anwendung der Systemwissenschaft bezieht heute sowohl die Fachleute der Systemwissenschaft als auch die Spezialisten der Anwendungsgebiete ein. In vielen Bereichen hat sich diese Zusammenarbeit mittlerweile bewährt.

Die Reihe «Interdisziplinäre Systemforschung» setzt sich zum Ziel, dem Studenten, dem Theoretiker und dem Praktiker über den neuesten Stand aus Lehre und Forschung, aus der Anwendung und der metatheoretischen Kritik dieser Wissenschaft zu berichten.

Dieser Rahmen soll noch insofern erweitert werden, als die Reihe in ihren Publikationen die mathematischen Modellierungsverfahren mit einbezieht, die in verschiedensten Wissenschaften in vielen Jahrzehnten zur Beschreibung und Optimierung von Systemen erarbeitet wurden.

Entgegen der früheren Tradition, in der die theoretische Regelungs- und Computerwissenschaft auf den Kreis der Mathematiker, Physiker und Ingenieure beschränkt war, liegt die Betonung dieser Reihe auf der Interdisziplinarität, die die Systemwissenschaft mittlerweile erreicht hat und weiter anstrebt. Stadt- und Regionalplaner, Psychologen, Physiologen, Betriebswirte, Volkswirtschaftler, Ökologen, Ernährungswissenschaftler, Soziologen, Politologen, Juristen, Pädagogen, Manager, Diplomaten, Militärwissenschaftler und andere Fachleute sehen sich zunehmend mit Aufgaben der Systemforschung konfrontiert oder sogar beauftragt.

Die ISR-Reihe wird Forschungsberichte – einschliesslich Dissertationen –, Vorlesungsskripten, Readers zu Vorlesungen und Tagungsberichte enthalten. Die Verwendung wenig aufwendiger Herstellungsverfahren soll dazu dienen, die Ergebnisse der Autoren in kürzester Frist einer möglichst breiten, interessierten Öffentlichkeit zur Diskussion zu stellen. Um auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, werden in Berichten über Arbeiten mit dem Computer wenn immer möglich auch die Befehlslisten im Anhang mitgedruckt.

Der internationale Charakter der Reihe soll durch die Aufnahme von Arbeiten in Deutsch, Englisch und Französisch aus Hochschulen und Forschungszentren aus aller Welt verwirklicht werden. Dafür soll eine entsprechende Zusammensetzung des Herausbergremiums sorgen.

ISR 41

**Interdisciplinary Systems Research
Interdisziplinäre Systemforschung**

Friedrich Niehaus

Computersimulation langfristiger Umweltbelastung durch Energieerzeugung

Kohlendioxyd, Tritium und Radio-Kohlenstoff

1977 Springer Basel AG

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Niehaus, Friedrich

Computersimulation langfristiger Umweltbelastung
durch Energieerzeugung: Kohlendioxyd, Tritium
u. Radio-Kohlenstoff. — 1. Aufl.

(Interdisciplinary systems research; 41)

ISBN 978-3-7643-0929-9 ISBN 978-3-0348-5740-6 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-0348-5740-6

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the copyright owner.

© Springer Basel AG 1977

Ursprünglich erschienen bei Birkhäuser Verlag Basel, 1977

VORWORT

Die fortschreitende Industrialisierung unserer Gesellschaft hat dazu gefuehrt, dass Entscheidungen ueber den Fortbestand herkoemmlicher oder die Einfuehrung neuer Technologien nicht mehr isoliert getroffen werden duerfen. Die Groessenordnung zukuenftiger Energieversorgungssysteme fordert eine Analyse der Wechselwirkungen zwischen Gesellschaft, Wirtschaft, Energieverbrauch und Umwelt unter den gegebenen physischen Randbedingungen. Ein solcher Ansatz wurde von Alfred Voss verfolgt und in der gleichen Schriftenreihe unter dem Titel "Ansaeetze zur Gesamtanalyse des Systems Mensch-Energie-Umwelt. Eine dynamische Computersimulation" veroeffentlicht. Die Abbildung dieses komplizierten Systems auf ein dem Computer zugaeugliches mathematisches Modell erforderte Vereinfachungen. Insbesondere erlaubte der Umweltsektor dieses Modell nur generelle Aussagen ueber zukuenftige Belastungen.

In der vorliegenden Arbeit wurden deshalb drei Schadstoffe untersucht, die eine globale Bedeutung haben und eng mit dem natuerlichen Stoffkreislauf der Erde verknuepft sind. Die fuer eine Zukunftsanalyse notwendigen Abschaetzungen zukuenftiger Energieverbrauchsraten wurden aus den von A. Voss ermittelten Zeitreihen uebernommen.

Durch Energieerzeugung freigesetzte Schadstoffe mit globalen Auswirkungen sind Kohlendioxyd (CO_2) und Isotope des Kohlenstoffs (C-14), des Kryptons (Kr-85) und des Wasserstoffs (H-3), das auch als Tritium bezeichnet wird. Die Emissionen der radioaktiven Isotope durch den nuklearen Brennstoffzyklus erhoehen die Strahlenbelastung des Menschen. Kohlendioxyd, das durch den Verbrauch fossiler Energietraeger (Kohle, Erdoel, Erdgas) freigesetzt wird, hat in den hier angesprochenen Konzentrationen keine direkten gesundheitlichen Folgen. Seine Gefaehrlichkeit liegt vielmehr darin,

dass es die Strahlungsbilanz der Atmosphaere beeinflusst und zu schwerwiegenden Veraenderungen des Klimas fuehren kann.

Abschaetzungen ueber zukuenftige Belastungen durch Kr-85 sind relativ einfach, da sich praktisch die gesamten Emissionen dieses Edelgases in der Atmosphaere verteilen und nur durch radioaktiven Zerfall reduziert werden. Die uebrigen Schadstoffe treten in den natuerlichen Kreislauf der Stoffe ein und sind deshalb, wie im folgenden dargelegt wird, wesentlich muehsamer zu behandeln.

Der jaehrlich messbare Anstieg der atmosphaerischen CO₂-Konzentration fuehrt zur Notwendigkeit einer Standardwertfestlegung fuer Kohlendioxydemissionen. Weiterfuehrende Forschung der Klimatologen konzentriert sich deshalb darauf, verlaesslichere Abschaetzungen der Auswirkungen des CO₂ auf die Temperatur der Atmosphaere zu erreichen. Es ist aber absehbar, dass sich ein definitiver, allgemein akzeptierter Zahlenwert fuer den 'greenhouse effect' nicht errechnen lassen wird. Aus diesem Grund wird man gezwungen sein, sich mit der Angabe von Wahrscheinlichkeiten fuer auftretende Klimaenderungen zu begnuegen. Es wird deshalb von der entscheidungstheoretischen Seite her daran gearbeitet, Verfahren aufzuzeigen, die eine optimale Entscheidung unter Einbeziehung der Unsicherheit in der Abschaetzung der Auswirkungen gestattet.

Wien, im Dezember 1976

Friedrich Niehaus

1.	ZIELE UND GRUNDLAGEN DER UNTERSUCHUNG	1
1.1	Die Veränderung der Umwelt	1
1.2	Grundlegende Problemstellung bei Umweltanalysen	4
1.2.1	Die Beschreibung der stofflichen Größen	4
1.2.2	Die Beschreibung des Schadens	4
1.2.3	Die Bewertung des Schadens	7
1.3	Die Auswahl der Simulationsmethode	8
1.3.1	Die Methode System Dynamics	8
1.3.2	Die Simulation von Zeitverzögerungen	11
1.3.3	Zur Genauigkeit des Integrationsverfahrens	16
1.4	Modellsimulation und Prognose	17
1.5	Die Auswahl der untersuchten Schadstoffe	19
1.5.1	Zur Auswahl des Kohlendioxyds	19
1.5.2	Zur Auswahl des Tritiums	20
2.	DAS KOHLENDIOXYD	21
2.1	Die Problematik des CO ₂	21
2.1.1	Die Bedeutung des CO ₂ für das Leben auf der Erde	21
2.1.2	Die CO ₂ -Konzentration der Atmosphäre	22
2.1.3	Die Temperatur der unteren Luftschicht	24
2.1.3.1	Der Energiehaushalt der Atmosphäre	24
2.1.3.2	Der Einfluß der atmosphärischen CO ₂ -Konzentration auf die Temperatur der unteren Luftschicht	28
2.2	Die CO ₂ -Emissionen	35
2.2.1	Die spezifische CO ₂ -Emission	35
2.2.2	Die CO ₂ -Emissionen der Vergangenheit	37
2.3	Die Analyse des Kohlenstoffkreislaufs	44
2.3.1	Die Loopstruktur des Kohlenstoffkreislaufs	44
2.3.2	Der CO ₂ -Gehalt der Atmosphäre	46
2.3.3	Vorrat und Umsetzungsraten organischer Kohlenstoffverbindungen des Festlands	48
2.3.4	Die Produktivität der Photosynthese des Festlands	51
2.3.5	Vorrat und Umsetzungsraten organischer Kohlenstoffverbindungen der Ozeane	56

2.3.6	Der Kohlenstoff der Ozeane in anorganischen Verbindungen	57
2.3.7	Die Produktivität der Photosynthese der Ozeane	64
2.3.8	Der CO ₂ -Austausch zwischen Atmosphäre und Ozeanen	65
2.4	Das CO ₂ -Modell	69
2.4.1	Die Modellstruktur	69
2.4.2	Die Anfangswerte im stationären Gleichgewicht	70
2.5	Die Modellverifizierung	75
2.5.1	Die Simulation der atmosphärischen CO ₂ -Konzentrationsentwicklung der Vergangenheit	75
2.5.2	Die Simulation des Suess-Effektes	77
2.5.3	Die Simulation der Durchschnittstemperatur der nördlichen Hemisphäre seit 1880	78
2.5.4	Das generelle Systemverhalten	81
2.6	Die Zukunftsanalyse	84
2.6.1	Die Ermittlung des Primärenergieverbrauchs	84
2.6.2	Das Modellverhalten unter Eingabe einer optimistischen Gleichgewichtsstrategie	85
2.6.2.1	Die Auswirkungen der CO ₂ -Emissionen	85
2.6.2.2	Die Aufschlüsselung der CO ₂ -Absorption	88
2.6.3	Der Einfluß der Modellparameter auf das Systemverhalten	91
2.6.3.1	Der Einfluß der Biosphäre des Festlands	91
2.6.3.2	Der Einfluß des Oberflächenwassers	93
2.6.3.3	Der Einfluß der Gleichgewichtsparameter	94
2.6.3.4	Der Einfluß der durchschnittlichen Verweilzeit des CO ₂ in der Atmosphäre	94
2.6.3.5	Die Sensitivität des Modells	95
2.6.4	Das Modellverhalten unter status quo-Bedingungen	97
2.6.5	Das Modellverhalten unter Einsatz von Reaktoren der 1. Generation	99
2.6.6	Das Modellverhalten unter weiteren Maßnahmen zur Reduzierung der CO ₂ -Emissionen	101
2.6.6.1	Die Grenzwerte für CO ₂ -Emissionen	101
2.6.6.2	Die Auswirkungen zusätzlicher Substitution fossiler Energieträger	103
2.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	105

3.	DAS TRITIUM	107
3.1	Die Problematik des Tritiums	107
3.1.1	Die physikalischen Eigenschaften des Tritiums	107
3.1.2	Die Auswirkungen des Tritiums auf den Menschen	108
3.1.2.1	Die zulässigen Gonadendosen	108
3.1.2.2	Die zulässigen Tritiumkonzentrationen im Körper	109
3.1.2.3	Die Strahlenbelastung des Menschen aufgrund von Tritiumkonzentrationen in Luft und Wasser	110
3.2	Der Wasserkreislauf der Erde	114
3.2.1	Die Wasserbilanz der Erde	114
3.2.2	Die Verteilung des Wassers der Erde	115
3.2.3	Die Verteilung des Wassers in der Atmosphäre	117
3.2.4	Das Wassermodell	120
3.2.4.1	Die Beschreibung des Wasserkreislaufs	120
3.2.4.2	Die Aufteilung auf Nord- und Südhalbkugel	123
3.3	Die Simulation des Tritiumkreislaufs und das generelle Verhalten des Modells	125
3.4	Die natürliche Tritiumbelastung	126
3.5	Die Tritiumbelastung durch Kernwaffen	129
3.6	Die Tritiumbelastung durch Energieerzeugung	129
3.6.1	Die spezifische Tritiumerzeugung	129
3.6.2	Die spezifischen Tritiumemissionen	132
3.6.3	Der Standardlauf	134
3.6.4	Der Einfluß der Modellparameter auf das Systemverhalten	137
3.6.4.1	Der Einfluß der atmosphärischen Austauschzeitkonstanten	137
3.6.4.2	Der Einfluß der Zeitkonstanten der Meeresströmungen	138
3.6.4.3	Der Einfluß der Oberflächenschichtdicke der Ozeane	139
3.6.4.4	Der Einfluß von Verdunstung und Niederschlag über den Ozeanen	140
3.6.5	Die Auswirkungen einer Tritiumrückhaltung durch Wiederaufarbeitungsanlagen	141

3.6.6	Zum Problem der Tritiumendlagerung	145
3.7	Zusammenfassung der Ergebnisse des Tritiummodells	147
4.	DAS KOHLENSTOFFISOTOP C-14	149
4.1	Die Problematik des C-14	149
4.2	Die natürliche C-14-Belastung	149
4.3	Die anthropogene C-14-Emission	151
4.4	Der Standardlauf und die Sensitivität des Modells	153
4.5	Das Modellverhalten unter Maßnahmen zur Reduktion der CO ₂ -Emissionen	156
4.6	Zusammenfassung der Ergebnisse der C-14-Rechnungen	157
5.	ZUR EINORDNUNG DER UNTERSUCHUNG	158
	LITERATURVERZEICHNIS	160
	STICHWORTVERZEICHNIS	