Warum die Diskussion zwischen Meadows und Cole-Curnow in Nature über die Retrodiktion der Weltmodelle am Thema vorbei geht

Prof. Dr. Eckart Zwicker

Technische Universität Berlin

Fachgebiet Unternehmensrechnung und Controlling

Berlin

Cole und Curnow behandeln in einem Beitrag in Nature die Retrodiktion der beiden Weltmodelle von Forrester und Meadows.[1)] Dabei beziehen sie sich auf eine mit Meadows geführte Diskussion über die Akzeptanz der Retrodiktion als ein Verfahren zur Gültigkeitsprüfung von System Dynamics Modellen. Im Folgenden wird diese Diskussion kommentiert. Weiterhin sollen die Argumente der Kontrahenten kritisch analysiert werden.

Cole und Curnow verwenden zur Retrodiktion der Weltmodelle ein Verfahren, welches man als DT-Minus-Verfahren bezeichnen kann. Wenn ein System Dynamics Modell simuliert wird, muss man einen Wert für das Zeitinkrement DT wählen. Im Idealfall ist DT infinitesimal klein, denn Forrester geht davon aus, dass die von ihm zu beschreibenden realen Systeme ausschließlich anhand von Differentialgleichung abgebildet werden sollen. Diese Differentialgleichungen werden aber im Rahmen einer Simulation durch Differenzengleichungen approximiert. DT beschreibt daher das Zeitintervall der Differenzengleichung, mit welcher das infinitesimal kleine Zeitintervall der Differentialgleichung approximiert werden soll.
Die Struktur und Semantik dieser Differenzengleichungen in einem System Dynamics Modell soll im Folgenden betrachtet werden. Dann wird ein Retrodiktionsverfahren vorgestellt, welches vom Verfasser entwickelt wurde. Es wird gezeigt wie das Cole-Curnowsche DT-Minus-Verfahren im Lichte dieses Retrodiktionsverfahrens zu beurteilen ist.
Damit ist die Grundlage geschaffen, um die Diskussion zwischen Meadows und Cole-Curnow kritisch zu kommentieren und zu zeigen, dass sie mit einigen Defekten belastet ist.

Ein System Dynamics Modell besteht aus drei Typen von Gleichungen. (Level-, Raten- und Hilfsgleichungen). Eine Levelgleichung ist eine Bestandsfortschreibungsgleichung. In der Notation der System Dynamics Sprache wird sie wie folgt beschrieben:[2)]

$$LEV.K = LEV.J + DT \cdot (ZUF.JK - ABF.JK) \qquad (1)$$

J und K sind Zeitsubskripte, die den gemeinhin verwendeten Zeitsubskripten t und t-1 entsprechen. Im Folgenden soll diese Zeitnotation verwendet werden. LEV.K ist daher der Endbestand des Levels am Ende der Periode t. LEV.J ist der Endbestand des Levels in der Periode t-1 und damit der Anfangsbestand in der Periode t. ZUF.JK ist der Zufluss, den der Level (die Bestandsgröße) zwischen den Zeitpunkten J und K erfährt. ABF.JK ist der entsprechende Abfluss. ZUF.JK und ABF.JK werden durch sogenannte Ratengleichungen spezifiziert. Diese Ratengleichungen können als erklärende Größen Hilfs- und Levelvariable enthalten. In einer Ratengleichung der DYNAMO-Sprache werden die zu erklärenden Raten mit dem Zeitindex „KL" spezifiziert. Die erklärenden Level- und Hilfsvariablen in dieser Gleichung besitzen den Zeitindex K. Wegen der Zeitinvarianz der Beziehungen kann man aber auch (was in der DYNAMO-Sprache nicht möglich ist) diese Ratengleichung um eine Periode verschieben. Die erklärten Ratenvariablen der auf diese Weise transformierten, aber strukturell identischen, Ratengleichungen besitzen damit statt „KL" das Zeitsubskript „JK" und die erklärenden Variablen der Ratengleichung besitzen statt „J" das Zeitsubskript „K". Setzt man die so umge-

1) Cole, H.S., Curnow, R.C., Backcasting with the World Dynamics Models, in: Nature Vol. 243, May 1973, Seite 63-65.

2) Ein Malzeichen zwischen Klammern ist nicht erforderlich. Malzeichen werden in der System Dynamics Sprache (DYNAMO) mit einem Stern gekennzeichnet. Im Folgenden wird von der Notation der Sprache abgewichen.

formten Ratengleichungen in die Levelgleichungen der Form (1) ein, dann hängt LEV.K nur von Leveln der Vorperiode LEV.J ab. Die Hilfsvariablen, welche als erklärende Variable in die Ratengleichungen eingehen, besitzen nur den Zeitindex K oder, wenn man die beschriebene Zeitverschiebung vornimmt, den Zeitindex J. Zwischen ihnen gibt es daher keine zeitverzögerten Beziehungen. Sie bilden somit ein System von algebraischen Gleichungen. Das System Dynamics Konzept (und damit Forresters Entwurf) schreibt vor, dass die Abhängigkeiten zwischen den Hilfsvariablen immer nur durch rekursive Gleichungssysteme beschrieben werden dürfen, d. h., die Verwendung simultaner aus Hilfsvariablen bestehender Gleichungssysteme ist verboten.

Diese Kennzeichnung der Gleichungstypen lässt erkennen, dass sich durch algebraische Operationen ein System Dynamics Modell auf ein System von Gleichungen reduzieren lässt, in denen nur noch die Level als erklärte Variable auftreten. Dieses auf Levelgleichungen reduzierte System besitzt die Form[3)]

$$L_i(t) = L_i(t-1) + DT \cdot F_i\left(L_1(t-1),\ldots,L_n(t-1)\right) \qquad (2)$$

mit i= 1,…, n.

Der Ausdruck $F_i(\ldots)$ beschreibt zumeist eine nichtlineare Beziehung. Davon wird im Folgenden ausgegangen. DT ist, wie erwähnt, das Zeitinkrement, welches zur Durchführung der Simulation zu wählen ist. Je kleiner man DT wählt, umso stärker nähert sich die zur Simulation verwendete Differenzengleichung (2) der als adäquates Beschreibungsmedium angesehenen Differentialgleichung an.

Nimmt man nunmehr an, t beschreibe das Jahr 1900, so kann der Wert eines Levels zu diesem Zeitpunkt durch L_i^{1900} gekennzeichnet werden. Setzt man diesen Wert in (2) ein, dann erhält man

$$L_i^{1900} = L_i(t-1) + DT \cdot F_i\left(L_1(t-1),\ldots,L_n(t-1)\right) \qquad (3)$$

(3) lässt sich umformulieren in

$$L_i(t-1) = L_i^{1900} - DT \cdot F_i\left(L_1(t-1),\ldots,L_n(t-1)\right) \qquad (4)$$

Um daher (im Rahmen einer Retrodiktion) den Wert vom $L_i(t\text{-}1)$ (oder $L_i^{1900\text{-}DT}$) zu berechnen, sind anhand des Gleichungssystems (4) die Werte der Variablen von $L_i(t\text{-}1)$ zu bestimmen.[4)]

Da sich die zu modellierenden Level eines Systems (nach Forresters Auffassung) immer in Feedbackkreisen befinden, bilden die Variablen $L_1(t\text{-}1)$ bis $L_n(t\text{-}1)$ in (4) ein System von nichtlinearen simultanen Gleichungen. Will man daher in dem Gleichungssystem (4) die Werte von $L_1(t\text{-}1)$ bis $L_n(t\text{-}1)$ bestimmen, so ist dieses Gleichungssystem zu lösen. Mit der Bestimmung seiner Lösungswerte wird aber zugleich eine Retrodiktion praktiziert. Denn unter Vorgabe der Levelwerte von 1900, d. h. L_i^{1900}, werden die Levelwerte für $L_i^{1900\text{-}DT}$ bestimmt. Hat man die Werte von $L_i^{1900\text{-}DT}$ bestimmt, kann man mit demselben Verfahren wieder die Werte der n Level $L_i^{1900\text{-}2DT}$ bestimmen usw. Die Retrodiktion erweist sich daher als sukzessive Lösung eines Systems von nichtlinearen simultanen Gleichungen.

---

3) Ein solches Gleichungssystem ist im Prinzip immer ermittelbar, weil System Dynamics Modelle rekursive Modelle sind.

4) Wählt man DT =1/12 so wäre der nächste zu ermittelnde Wert Dezember 1899.

Um diese simultanen Gleichungssysteme zu lösen, wurde vom Verfasser das Gauss-Seidel-Verfahren verwendet.
Das Gleichungssystem (4) wird entsprechend dem Gauss-Seidel-Verfahren unter Verwendung einer Rechenschleife immer wieder durchgerechnet. Jeder Rechenschritt k führt zu einem Wert der Levelvariablen, d. h. L_1^k bis L_n^k. Als Anfangswerte für diesen Iterationsprozess werden für $L_1(t-1)$ bis L_n (t-1) auf der rechten Seite der Gleichungen (4) die Werte des Jahres 1900, d. h. L_1^{1900} bis L_n^{1900} gewählt. Wenn der Prozess konvergiert (was zu hoffen ist), dann nähern sich von Schritt zu Schritt (von k-1 auf k) die Werte eines jeden Levels $L_i^{\ k}$ auf der linken Seite des Gleichungssystems immer stärker den erklärenden Werten von $L_i^{\ k-1}$ auf der rechten Seite der Gleichung an.
Die Stärke der Annäherung wird durch das Konvergenzkriterium $(L_i^k- L_i^{k-1})/L_i^k$ beschrieben. Wenn dieses Konvergenzkriterium für alle Level einen Wert von z. B. 10^{-6} unterschreitet, dann ist das Gleichungssystem gelöst. Das Konvergenzkriterium ist so zu wählen, dass beim Einsetzen der gefundenen Werte von $L_1(t-1)$ bis $L_n(t-1)$ in (1) genau der Wert des Levels L(t), d. h. L^{1900}, realisiert wird. Bei dem Level Bevölkerung (Population) in Forresters Modell waren dies 1,65 Milliarden Einwohner. Der rückprognostizierte Levelwert muss nicht auf den Punkt genau mit dem Ausgangswert übereinstimmen. Das ist bei einem Iterationsverfahren nie möglich. Es kommt nur darauf an, dass der Zeitverlauf der Levelvariablen nach vorne „möglichst geringe Abweichungen“ zeigt. Durch eine Verschärfung des Konvergenzkriteriums kann man aber die Anfangswerte wieder beliebig genau ermitteln.
Diese Bemerkungen sind notwendig, um das Verfahren von Cole und Curnow zu verstehen. Denn Cole und Curnow führen kein Verfahren dieser Art durch. Ihr Verfahren ist extrem einfach. Die ursprünglichen Levelgleichungen, die zur Formulierung eines System Dynamics Modells verwendet werden, sind in (1) beschrieben. Die Spezifikation des Zeitinkrementes von DT in diesen Levelgleichungen zur Durchführung der Simulation erfolgt durch eine generelle Anweisung.
Cole und Curnow wählen nunmehr, um eine Retrodiktion (sie sprechen von „*backcasting*“) vorzunehmen, einfach den negativen statt des bisher positiven Wertes des Zeitinkrementes und lassen damit das Modell „nach hinten“ laufen.
Forrester wählte in seinem Modell DT = 0.25. Um die Retrodiktion im Sinne der Autoren vorzunehmen, braucht man also nur (in einer Spezifikationsanweisung) DT = -0.25 zu wählen und dann die Simulation zu starten. Einfacher geht es nicht. Nunmehr läuft das Modell nach hinten und nicht mehr nach vorne.
Betrachtet man aber dieses Vorgehen im Lichte der bisherigen Ausführungen, dann erweist es sich als die Durchführung einer Gauss-Seidel-Prozedur mit gerade einem Iterationsschritt. Denn der erste Iterationsschritt der Gauss-Seidel-Prozedur besteht in einer Durchrechnung des Gleichungssystems (4) und, wie man erkennt, ist dort DT minus gewählt.
Es fragt sich daher, ob bei einem Abbruch des Verfahrens nach dem ersten Iterationsschritt (ohne Verwendung eines Konvergenzkriteriums) die ermittelten Levelwerte von $L_i(t-1)$ (oder $L_i^{1900-DT}$) zu einem Wert führen, der zur Folge hat, dass die Werte L_i^{1900} hinreichend genau realisiert werden, wenn man die Rückrechnung vornimmt.
Die Genauigkeit muss so groß sein, dass der Zeitpfad nach vorne wiederum (weitgehend) der ursprünglichen Prognose entspricht. Meine Simulationen mit dem Forrester- und dem

Meadows-Modell kamen zu dem Ergebnis, dass dies nicht der Fall war. Aus meiner Sicht ist diese „DT-Minussetzung“ daher ein kaum zu akzeptierendes Retrodiktionsverfahren.[5)]
Nach der Kennzeichnung der beiden Retrodiktionsverfahren soll auf die Diskussion von Meadows mit Cole-Curnow eingegangen werden.

Die Autoren weisen darauf hin, dass System Dynamics Modelle durch ein System von „non probabilistic non linear first order difference equations“ repräsentiert werden.[6)] Sie kommen aber nicht auf den Gedanken, dass die Retrodiktion auch auf der Basis von Differenzengleichungen praktiziert werden sollte.
Cole und Curnow setzen in dem Modell DT minus und schauen, was dabei rauskommt. Daher gehen sie nicht der Frage nach, unter welchen Bedingungen der Retrodiktion mit dem Differenzengleichungsmodell (4) ein „eindeutiger Retrodiktionswert“ ermittelt werden kann. Sie sprechen nur davon, dass bei ungünstigen Bedingungen eine Retrodiktion mit „*numerical errors in the computation*“ behaftet sein kann. Im Lichte des simultanen Gleichungssystems (4) wird aber klar, unter welchen Bedingungen eine Retrodiktion nicht möglich ist. Sie ist dann nicht möglich, wenn das simultane nichtlineare Gleichungssystem mehr als eine - also keine eineindeutige - Lösung hat. Bei zwei Lösungen wäre es beispielsweise unentscheidbar, welcher Wert dann für den nächsten Rückrechnungsschritt gewählt werden soll.
Diese Unklarheit über den Status einer inakzeptablen Rückrechnung zeigt sich in der Diskussion mit Meadows über die Durchführbarkeit von Retrodiktionen. Meadows führte mit dem Forrester-Modell unter Verwendung des DT-Minus-Verfahrens eine Rückrechnung, beginnend im Jahre 1940, durch. Der von Meadows ermittelte Zeitverlauf der Bevölkerung ergab, dass er überhaupt nicht mit dem Zeitverlauf der Vorwärtsprognose des Modells von 1900 bis 1940 übereinstimmte. Meadows schließt aufgrund dieses Ergebnisses, dass eine Rückwärtsprognose oder Retrodiktion wegen der auftretenden numerischen Fehler in den Weltmodellen grundsätzlich nicht möglich ist. Die Autoren entgegnen hierauf, dass diese Ergebnisse einer Rückrechnung, die auch bei ihnen auftreten, durch „*numerical errors in the computation*“ bedingt sind. Begründet wird diese Behauptung aber nicht.
Meadows verfehlte Rückrechnung könnte aber zwei Gründe haben. Zum einen könnte es sich zeigen, dass das nichtlineare simultane Gleichungssystem (4), mit welchem die Rückrechnung von 1940 ab erfolgt, in irgendeiner der sukzessiven Lösungen zu keiner eineindeutigen Lösung gelangt. Dann läge die falsche Rückrechnung nicht an den „*numerical errors in the computation*“.
Wenn aber tatsächlich numerische Fehler bei Anwendung der DT-Minus-Retrodiktion durch Meadows vorlagen, dann könnte dies dadurch nachgewiesen werden, indem man eine Rückrechnung vornimmt, bei welcher die Anfangswerte der Level im Jahre 1900 tatsächlich reproduziert werden. Eine solche Rückrechnung wurde vom Verfasser mit dem beschriebenen Verfahren einer sukzessiven Lösung des simultanen Gleichungssystems (4) vorgenommen und es zeigte sich, dass diese Rückrechnung von 1940 an genau zu den Anfangswerten der Level des Weltmodells im Jahre 1900 führte. Damit ist die von Meadows anhand eines Beispieles beleg-

5) S. Zwicker, E., Möglichkeiten und Grenzen der modellgestützten Prognose sozioökonomischer Entwicklungen, dargestellt am Beispiel der Weltmodelle von Meadows und Forrester, Wissenschaftszentrum, Berlin 1976, Aufruf: www.Inzpla.de/Weltmodell-Analyse.pdf.

6) Sämtliche fett gedruckten Zitate entstammen dem zitierten Beitrag von Cole und Curnow in Nature.

te generelle Behauptung, dass eine Retrodiktion schon allein aus numerischen Gründen nicht möglich sei, in begründeter Weise ausgeräumt.[7)]

Neben diesem Einwand, d. h. der numerischen Unzulänglichkeit einer Rückrechnung, führt Meadows noch einen zweiten Einwand ins Feld, der als „Einwand der Unzulänglichkeit der Anfangswerte“ bezeichnet werden soll.

Um diesen Einwand angemessen zu behandeln, ist es notwendig, den Status der Anfangswerte in sogenannten Verzögerungsleveln (Delay3- und Smooth-Leveln) zu erörtern.

Cole und Curnow weisen darauf hin, dass System Dynamics Modelle stets durch ein System von Differenzengleichungen erster Ordnung beschrieben werden. Daher besitzen System Dynamics Modelle ihrer Auffassung nach keine wahren Verzögerungen (true delays).[8)] Damit meinen die Autoren, dass ein System Dynamics Modell keine verteilten Verzögerungshypothesen (distributed lag hypotheses) der Form

$$ABF(t) = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot ZUF(t-i) \qquad (5)$$

aufweist. Denn diese besitzen nicht nur wie Differenzengleichungen ersten Grades erklärende Variablen, welche höchstens um eine Periode verzögert sind. Die Funktion w_i in (5) wird als die Gewichtsfunktion der Verzögerungshypothese bezeichnet.

System Dynamics Modelle erlauben aber dennoch die Modellierung von verteilten Verzögerungshypothesen der Form (5) Die verteilten Verzögerungshypothesen in System Dynamics Modellen erfahren dabei eine besondere Interpretation. Die Größe ZUF wird immer als der Zufluss in ein Verzögerungslevel interpretiert und die Größe ABF als der Abfluss aus diesem Level. Eine verteilte Verzögerungshypothese beschreibt daher die Übergangsfunktion zwischen dem Zu- und Abfluss eines solchen (Verzögerungs-) Levels. Es werden dabei ganz bestimmte Typen von Gewichtsfunktionen w_i verwendet, die sich ausschließlich durch die durchschnittliche Verzögerung (DVZ) beschreiben lassen, welche die Elemente im Durchschnitt erfahren, bevor sie nach ihrem Eintritt in das Level (über ZUF) diesen (über ABF) wieder verlassen. Daher sollen diese Hypothesen nicht als Verzögerungshypothesen, sondern spezieller als Delay3-Verweilzeithypothesen bezeichnet werden.[9)]

Es fragt sich aber, wie solche Delay3-Verweilzeithypothesen der Form (5) in einem System Dynamics Modell verwendet werden können, wenn es nur aus Differenzengleichungen ersten Grades besteht.

Die Antwort ist, dass die in System Dynamics Modellen verwendete Delay3-Verweilzeithypothesen durch ein System von drei kaskadierenden Differenzengleichungen erster Ordnung beschrieben werden können. Mit anderen Worten: Obgleich man nur Differenzengleichungen erster Ordnung verwendet, können diese dennoch zur Modellierung solcher Delay3-Verweilzeithypothesen und damit zur Modellierung von „true delays“ verwendet werden.

---

7) In der Programmiersprache DYNAMO wurde das Modell in einer FORTRAN-Version mit „single precision“ umgesetzt. Mein Programm wurde auf einer FORTRAN-Version der IBM 370/158 in dem Modus „double precision“ realisiert.

8) „*The equations used to introduce delays in the System Dynamics method also take the form of first order difference equations (they do not represent true delays*)”.

9) Forrester spricht von „*exponential delays of third order*“. Die Makrofunktionen, mit denen sie aufgerufen werden, haben den Namen Delay3.

Dies soll im Folgenden gezeigt werden, weil nur bei Kenntnis dieser Zusammenhänge Meadows Einwand der „Unzulänglichkeit der Anfangswerte“ angemessen erörtert werden kann.

Exkurs

Jede inhomogene lineare Differenzengleichung der Form

$$A(t) = a_1{*}A(t-1) + a_2{*}y(t-2) + ... + a_n{*}A(t-n) + E(t) \qquad (6)$$

kann auch durch ihre sequentielle Form beschrieben werden. Diese ist

$$A(t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \; {*}E(t-i) \qquad (7)$$

Die Funktion g_i wird als Gewichtsfunktion bezeichnet. Wenn man die Variable E als einem Mengengröße (Stromgröße) interpretiert, die in ein „black box“ (.z.B. ein Lager) und ohne Verluste oder eine Vermehrung verzögert als Ausgangsgröße (A) aus der „black box“ wieder herauskommt, dann kann man g_i als Verzögerungsfunktion bezeichnen. Diese Verzögerungsfunktion zeichnet sich dadurch aus, dass sie einen dynamischen Multiplikator von 1 besitzt. Dies ist dann und nur dann gewährleistet, wenn

$$\sum_{i=0}^{\infty} g_i = 1 \qquad (8)$$

Es läßt sich zeigen, dass man die zyklische Form (6) in die sequentielle Form (7) überführen kann. Dies gilt aber nur dann, wenn bei t = 0 entweder sämtliche Anfangswerte A(t-1) bis A(t-n) den Wert 0 besitzen sind oder ein Systemgleichgewicht vorliegt. Das ist der Fall, wenn

$$A(t) = A(t-i) \quad \text{für } i = 1,...,n \qquad (9)$$

d.h. die erklärte Variable A(t) in (6) und sämtliche Anfangswerte sind gleich. Es ist von Interesse, den Verlauf eines solchen Verzögerungsfunktion (Gewichtsfunktion) zu kennen. Weiterhin ist aber auch noch eine weitere Größe von Interesse. Das ist die durchschnittliche Verzögerung (DVZ), die eine Element aus der in die „black box„ eintretenden Eingangsmenge (E) erfährt, bevor es wieder als ein Element der Ausgangsmenge (A) die „black box“ verlässt. Diese durchschnittlicher Verzögerung (DVZ) wird durch

$$DVZ = \sum_{i=1}^{\infty} gi * i \qquad (10)$$

beschrieben.

Im Rahmen von System Dynamics werden inhomogene Differenzengleichungen der ersten Ordnung zur Beschreibung der Modellzusammenhänge verwendet. Eine Differenzengleichung der ersten Ordnung besitzt die Form

$$A(t) = a \bullet A(t-1) + E(t) \qquad (11)$$

Ihre sequentielle Form läßt sich einfach ermitteln. Sie ist

$$A(t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i * E(t-i) \qquad (12)$$

Die Verzögerungsfunktion a^i in (12) entspricht einer geometrischen Folge.

Zur Darstellung der Delay3-Verzögerunsgslevel werden nunmehr von Forrester drei kaskadierende Differenzengleichungen erster Ordnung verwendet. Wenn man bei dem „black-box-Beispiel bleibt, dann kann man sich das so vorstellen , dass sich drei „black boxes“ hintereinander angeordnet sind. Der Ausgang (A_1) der ganz rechts befindlichen fungiert als Eingangsgröße (E_2) der in der Mitte befindlichen black box und deren Ausgangsgröße (A_2) ist wiederum die Eingangsgröße (E_3) der ganz links befindlichen mit der Ausgangsgröße (A_3) Diese drei „kaskadierenden Differenzengleichungen“ können durch

$$A_1(t) = a_1 \bullet A_1(t-1) + b_1 \bullet E_1(t-1) \qquad (13)$$

$$E_2(t) = A_1(t) \qquad (14)$$

$$A_2(t) = a_2 \bullet A_2(t-1) + b_2 \bullet E_2(t-1) \qquad (15)$$

$$E_3(t) = A_2(t) \qquad (16)$$

$$A_3(t) = a_3 \bullet A_3(t-1) + b_3 \bullet E_3(t-1) \qquad (17)$$

beschrieben werden. Die Verzögerungsfunktion jeder einzelnen Differenzengleichung entspricht eine geometrischen Folge, aber insgesamt resultiert aus ihrem Verzögerungsverhalten eine Verzögerungsfunktion, die keine geometrische Folge darstellt, sondern eingipfeligen Verlauf besitzt

Als Erstes wird nunmehr gezeigt, wie ein System von drei kaskadierenden Differenzengleichungen mit einer bestimmten Struktur der Modellparameter die Beziehungen einer Delay3-Verweilzeithypothese beschreibt, die wie erwähnt zur Gruppe der verteilten Verzögerungshypothesen (5) gehören. Die spezielle Gewichtsfunktion w_i einer Delay3-Verweilzeithypothesen wird daher im Folgenden aus den drei beschriebenen kaskadierenden Differenzengleichungen erster Ordnung hergeleitet.
Nachdem diese Herleitung erfolgt ist, stellt sich die Frage, wie der Status der Anfangswerte der drei kaskadierenden Levelgleichungen im Lichte ihrer Verwendung als Delay3-Verweilzeithypothesen zu beurteilen sind.
Hier wird sich zeigen, dass Cole und Curnow aufgrund der Unkenntnis dieser Zusammenhänge einen wesentlichen Kritikpunkt von Meadows gegen die Akzeptanz einer Retrodiktion nicht angemessen beantworten können. Aber noch viel weitergehender wird die folgende Analyse zeigen, dass das Weltmodell von Meadows wegen eines „gravierenden Anfangswertproblems“ ein aus zwingenden Gründen inakzeptables Prognosemodell darstellt. Um dies nachzuweisen, ist im Folgenden die Gewichtsfunktion einer Delay3-Verweilzeithypothese zu ermitteln.

Beginnen wie mit der Beschreibung der speziellen Form der von Forrester verwendeten drei kaskadierenden Levelgleichungen. Sie besitzen einen Zu- und Abfluss (ZUF1 und ABF3), welche dem Zu- und Abfluss (ZUF und ABF) in (5) entsprechen. Jede der drei Levelgleichungen hat einen Zu- und Abfluss. Die drei Levelgleichungen sowie die Verknüpfung ihrer Zu- und Abflüsse werden durch (18) und (19) beschrieben:

$$ABF_i(t) = \frac{T-1}{T} ABF_i(t-1) + \frac{1}{T} ZUF_i(t-1) \qquad i = 1,2,3 \tag{18}$$

$$ZUF_i(t) = \begin{cases} ABF_{i-1}(t) & i=2,3 \\ ZUF_i(t) & i=1 \end{cases} \tag{19}$$

und

$$T = DVZ/3(DT). \tag{20}$$

(8)

Man erkennt, dass die Parameter der drei Levelgleichungen eine besondere Struktur ihrer Parameter besitzen. Die verzögerte Variable ABF_i (t-1) besitzt den Ausdruck „T-1/ T“ als Parameter , während ZUF_i(t-1) durch den Parameter „1/T“ gekennzeichnet ist. T ist eine Größe, die von dem Modellanwender gewählt werden kann, indem er gemäß (20) die durchschnittliche Verzögerung der Delyay3-Verzögerung (DVZ) und das Zeitinkrement der Simulation (DT) in Bezug auf die Einheit von DVZ bestimmt. Wählt er beispielsweise DVZ in der Einheit TIME= Monat und DT= 0,1 dann bedeutet dies, dass das Modell in Zeitabständen von 0,1 Monaten durchgerechnet wird.[10] Die Festlegung von T gemäß (20) geht von der Annahme aus, dass die Verzögerungsfunktion der Delay3-Verzögerung, die durch (18) und (19) beschrieben wird eine gemäß (5) definierte durchschnittliche Verzögerung des mit (20) spezifizierten Betrages von DVZ besitzt. Das ist aber eine Annahme, deren Richtigkeit man erst dann beweisen kann, wenn man die gesamte Verzögerungsfunktion g_i der drei kaskadierenden Verzögerungen bestimmt hat und dann gemäß (5) deren durchschnittliche Verzögerung DVZ berechnet. Wenn die Annahme zutrifft muss sie mit dem sich aus (20) ergebenden

$$DVZ = T \cdot 3 \cdot DT \tag{21}$$

übereinstimmen.

Nunmehr soll die gesamte Verzögerungsfunktion g_i der durch (18) bis (20) beschriebenen drei kaskadierenden Verzögerungen ermittelt werden

Mit der Einführung des Differenzen-Operators

$$K^n x(t) = x(t-n) \tag{22}$$

folgt aus (6) und (9)

$$ABF_i(t)\left[1 - \frac{K(T-1)}{T}\right] = \frac{K}{T} ZUF_i(t). \tag{23}$$

Aus (23) folgt

$$ABF_i(t) = \left[1 - K\left(\frac{T-1}{T}\right)\right]^{-1} \frac{K}{T} ZUF_i(t). \tag{24}$$

Definiert man das Operatorpolynom der Übergangsfunktion in (24) mit

[10] Da der ursprüngliche Ansatz Forresters als Differentialgleichungsmodell konzipiert ist, handelt es sich hier um eine Approximation dieses Modells mit Hilfe eines Differenzengleichungsmodells. Im Idealfall ist daher DT infinitesimal klein. Forrester fordert, dass im Rahmen der Simulation die Relation DT< DVZ/6 eingehalten werden muss.

$$G = [1 - K((T-1)/T)]^{-1}(K/T), \tag{25}$$

dann implizieren (24) und (25)

$$ABF_i(t) = G \cdot ZUF_i(t). \tag{26}$$

Die Delay3-Verweilzeithypothese wird durch eine Kette von drei kaskadierenden Gliedern mit demselben Operatorpolynom G in (25) beschrieben. Die Operatorenübergangsfunktion zwischen dem Eingang ZUF_1 und dem Ausgang ABF_3 ergibt sich nach der Reduktionsvorschrift kaskadierender Glieder aus:[11)]

$$ABF_3(t) = G^3 \cdot ZUF_1(t). \tag{27}$$

Unter Anwendung der vereinfachenden Schreibweise

$$ABF_3(t) = ABF(t) \tag{28}$$

$$ZUF_1(t) = ZUF(t) \tag{29}$$

folgt aus (27) bis (29)

$$ABF(t) = [1 - K((T-1)/T)]^{-3}(K^3/T^3)ZUF(t). \tag{30}$$

Mit (30) ist die Delay3-Verweilzeithypothese bestimmt.

In einem <u>zweiten</u> Schritt soll die Verzögerungsfunktion (Gewichtungsfunktion) von(30) ermittelt werden. Aufgrund des Binominallehrsatzes gilt:

$$\left[1 - K\left(\frac{T-1}{T}\right)\right]^{-n} = \sum_{n=0}^{\infty}\binom{3+n-1}{n}(\lambda K)^n \tag{31}$$

mit

$$\lambda = \left(\frac{T-1}{T}\right). \tag{32}$$

Aus (30) bis (32) folgt die sequenzielle Darstellung der Delay3-Verweilzeithypothese

$$ABF(t) = \left[\frac{1}{T}\right]\sum_{n=0}^{\infty}\binom{3+n-1}{n}\left(\frac{T-1}{T}\right)^n ZUF(t-3-n). \tag{33}$$

Es gilt

$$\left[\frac{1}{T^3}\right] = \left[1 - 1 + \frac{1}{T}\right]^3 = \left[1 - \frac{T-1}{T}\right]^3. \tag{34}$$

Mit (20) und (21) folgt

$$ABF(t) = \left[1 - \frac{T-1}{T}\right]^3 \sum_{n=0}^{\infty}\binom{3+n-1}{n}\left(\frac{T-1}{T}\right)^n ZUF(t-3-n). \tag{35}$$

Die Gewichtungsfunktion des „*true delays*“ oder der verteilten Verzögerungshypothese (5) ergibt sich aus (33). Sie ist die Gewichtsfunktion einer Delay3-Verweilzeithypothese. Sie besitzt immer einen eingipfeligen Verlauf.

---

11) Siehe Zwicker, E., Simulation und Analyse dynamischer Systeme in den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Berlin 1981, S. 228 f.

$$w_i = \begin{cases} 0 & \textit{für} \quad i = 0,1,2 \\ \left(1 - \frac{T-1}{T}\right)^n \binom{t-1}{t-3} \left(\frac{T-1}{T}\right)^{t-3} & \textit{für} \quad i = 3,4,... \end{cases} \tag{36}$$

Der Benutzer muss, wenn er in einem Modell mithilfe der DYNAMO-Sprache eine solche Delay3-Verweilzeithypothese formulieren will, eine sogenannte Makrofunktion verwenden. Hat der Benutzer somit entschieden, dass die Verzögerung zwischen dem Abfluss (ABF) und dem Zufluss (ZUF) eines Verzögerungslevels durch eine Delay3-Verweilzeithypothese beschrieben werden soll, dann wird dies in der DYNAMO-Sprache durch die Anweisung oder Makrofunktion

$$ABF.KL = DELAY3(ZUF.JK, DVZ) \tag{37}$$

ausgedrückt. DVZ ist, wie beschrieben, die durchschnittliche Verzögerung, die ein Element erfährt, wenn es in den Verzögerungslevel über ZUF eintritt, bevor es mit ABF wiederum den Level verlässt. Für DVZ hat der Benutzer bei einer konkreten Anwendung einen Zahlenwert einzugeben. Da eine Delay3-Verweilzeithypothesen wie beschrieben durch drei kaskadierende Differenzengleichungen erster Ordnung beschrieben wird, führt eine Expansion der Makrofunktion in die sie repräsentierenden elementaren Gleichungen der DYNAMO-Sprache zu den folgenden Levelgleichungen und deren Anfangswerten. [12)]

$$LV_1.K = LV_1.J + DT \cdot (ZUF.JK - ABF_1.JK) \tag{38}$$

$$ABF_1.KL = LV_1.K/(DVZ/3) \tag{39}$$

$$LV_2.K = LV_2.J + DT \cdot (ABF_1.JK\text{-}ABF_2.JK) \tag{40}$$

$$ABF_2.KL = LV_2.K/(DVZ/3) \tag{41}$$

$$LV_3.K = LV_3.J + DT \cdot (ABF_2.JK\text{-}ABF_3.JK) \tag{42}$$

$$ABF_3.KL = LV_3.K/(DVD/3) \tag{43}$$

mit den Anfangswerten

$$LV_1 = LV_2 = LV_3 = DVZ/3 \tag{44}$$

Dabei ist entsprechend (28) und (29) ZUF der Zufluss des gesamten DELAY3-Verzögerungslevels und ABF_3 sein Abfluss (ABF).

Für die drei Levelgleichungen (38), (40) und (42) wird jeweils ein Anfangswert gewählt, der (von Forrester so bestimmt und in DYNAMO fest programmiert) für alle drei Level mit DVZ/3 gewählt wird. Da die drei kaskadierenden Levelgleichungen aber eine Delay3-Verweilzeithypothese beschreiben, liegt die Frage nahe, wie denn die die Spezifikationsvorschrift (44) zur Bestimmung der Anfangswerte der drei Level LV_1 bis LV_3 zu deuten ist. Die Antwort ist, dass diese Anfangswerte die verzögerten Einflüsse zwischen ZUF und ABF in „kompakter Form“ beschreiben, die vor Beginn der Modellprognose (z. B. zum Zeitpunkt 1900) stattgefunden haben.

Meadows verwendet in seinem Modell verschiedene Delay3-Verweilzeithypothesen, wobei er hierzu die beschriebene Makrofunktion mit den Levelgleichungen (38), (40), (42) und deren Anfangswertbestimmung (44) verwendet. Es stellt sich daher die Frage, wie die in der DY-

---

12) Die Notation entspricht nicht mehr vollständig der DYNAMO-Sprache. Dort gibt es keine Verwendung von Indizes wie in LV_1. LV_1 müsste daher in DYNAMO LV1 heißen.

NAMO-Sprache festgelegte Wahl der Anfangswerte der drei Level mit dem Wert DVZ/3 zu rechtfertigen ist, wenn man in Betracht zieht, dass die kaskadierenden Level eine Delay3-Verweilzeithypothese mit der Gewichtsfunktion (36) beschreiben soll.
Diese Rechtfertigung hierfür liefert Forrester. Er hat das System Dynamics Konzept ursprünglich nur für eine bestimmte Art der Untersuchung verwendet, die aus der Regelungstheorie stammt und als Testantwortanalyse (test response analysis) bezeichnet wird. Eine Testantwortanalyse kann man an einem realen System aber auch anhand eines Modells durchführen, welches ein reales System beschreibt. Im Fall der Testantwortanalyse an einem realen System wird das System (z. B. ein Thermostat) in einen Gleichgewichtszustand versetzt. Dann wird dem System ein „Testeingang“ aufgeprägt.
Das kann z. B. ein Impuls oder ein Step sein. Der zeitliche Verlauf einer damit aus dem Gleichgewicht gebrachten Systemvariablen, die von Interesse ist, nennt man dann einen „pulse response“ oder einen „step response“. Forrester hat das System Dynamics Konzept ursprünglich nur für die Analyse von Unternehmen verwendet. Daher nannte er es Anfangs auch Industrial Dynamics.[13)] Erst später hat er diese Konzeption so erweitert, dass sie für alle denkbaren Systeme gelten soll und ihr den Namen System Dynamics gegeben. Die Modellierungsprinzipien blieben aber unverändert. In seinem ursprünglichen Werk, in welchem er das „Industrial Dynamics Konzept“ beschreibt, wird dieses Konzept von ihm anhand der Entwicklung und Analyse des System Dynamics Modells eines Unternehmens, der Sprague Electric Company, demonstriert. Die Analyse dieses Modells erfolgt ausschließlich mithilfe solcher Testantwortanalysen. Die Testantwortanalyse ist das einzige Analyseverfahren, welches Forrester zur Untersuchung seiner Modelle anwendete.
Um eine solche Testantwortanalyse durchführen zu können, müssen die Anfangswerte der Level LV1 bis LV3 in (38), (40) und (42) so gewählt werden, dass sich der Verzögerungslevel im Gleichgewicht befindet. Das bedeutet, dass z. B. ein gleichgewichtiger (über die Zeit unveränderter) Zufluss des Betrages ZUF = 100 zu einem entsprechenden Abfluss (ABF) des Betrages ABF = 100 aus dem Verzögerungslevel führt. Durch die Wahl der Levelanfangswerte DVZ/3 wird erreicht, dass die Ausdrücke in den Klammern von (38), (40) und (42) Null werden und damit die Levelwerte J den Levelwerten K entsprechen, also ein Gleichgewicht vorliegt.
Meadows verwendet aber (und das ist ein elementarer Kritikpunkt an seinem Modell) diese Delay3-Funktionen mit den Anfangswerten zur Herbeiführung eines Gleichgewichtes im Rahmen seines Wachstumsmodells. Damit wird aber stillschweigend unterstellt, dass alle Variablen des Modells, die den Zufluss (ZUF) zu einem Verzögerungslevel beeinflussen, dessen Übergangsfunktion eine Delay3-Verweilzeithypothese ist, sich im Gleichgewicht befunden haben. Denn sonst wäre es unangemessen, diese Anfangsbedingungen für diese Delay3-Verweilzeithypothese zu wählen. Da dies nicht der Fall ist, hat Meadows Modell einen gravierenden Defekt. Cole und Curnow haben diesen Defekt des Modells nicht erkannt, was zur Folge hat, dass sie wie später gezeigt wird, auf Meadows Einwände gegen eine Retrodiktion kein Gegenargument zur Verfügung haben.

13) Forrester, J. W., Industrial Dynamics, Cambridge, Mass. 1961.

Neben den Delay3-Verweilzeithypothesen gibt es noch eine weitere Input-Output-Relation, die den Zu- und Abfluss eines sogenannten Smooth-Levels (oder Prognose-Levels) beschreibt. Ein Smooth-Level beschreibt den von einer bestimmten Person oder Personengruppe über die Zeit prognostizierten Wert einer Größe X. Dabei wird unterstellt, dass die praktizierte Prognose immer anhand des Prognoseverfahrens einer exponentiellen Glättung erfolgt. Bei diesem Verfahren soll für eine Größe X(t) aufgrund einer Prognosegleichung Periode für Periode eine Prognose erstellt werden. Die zu prognostizierende Größe wird mit PX(t) bezeichnet. Die Prognosegleichung im Falle des Prognoseverfahrens einer exponentiellen Glättung besitzt die Form:

$$PX(t) = PX(t-1) + GLK \cdot \left(RX(t-1) - PX(t-1)\right) \qquad (45)$$

GLK ist die sogenannte Glättungskonstante. RX(t-1) ist der in der Vorperiode realisierte Wert von X. Forrester, der aufgrund seines Level-Raten-Paradigmas sämtliche Differenzengleichungen ersten Grades als Levelgleichungen interpretieren muss, interpretiert nunmehr auch diesen Zusammenhang (allerdings missglückt) als eine Level-Ratenbeziehung. Das geht so: Die Prognosevariable PX (t) wird als fortzuschreibende Levelvariable eines Prognoselevels interpretiert. Dieses Prognoselevel wird durch den Levelwert der Vorperiode P.LEV.J = PX (t-1) sowie einem Zufluss ZUF.JK und einem Abfluss ABF.JK erklärt. Damit kann die Gleichung des Prognoselevels wie folgt in Form einer Levelgleichung geschrieben werden;

$$PLEV.K = PLEV.J + (DT) \cdot (ZUF.JK - ABF.JK) \qquad (46)$$

Um aber eine exponentielle Glättungsprognose der Form (45) zu praktizieren, müssen die Zu- und Abflüsse der Levelgleichung (46) in einer bestimmten Form definiert werden. Diese ist

$$ZUF.JK = ZUF_1.JK / SMK \qquad (47)$$

mit

$$SMK = 1/GLK \qquad (48)$$

als Smoothkonstante.[14)] Die Abflussrate wird unter Verwendung der Smoothkonstante mit

$$ABF.JK = ABF_1.JK / SMK \qquad (49)$$

definiert.

Diese Beziehungen werden in der Smooth-Makrofunktion zu einer Gleichung zusammengefasst, d. h.

$$PLEV.K = PLEV.J + (DT) \cdot (ZUF.JK - PLEV.J) / SMK \qquad (50)$$

Als Anfangswert des Levels PLEV wird von Forrester

$$PLEV = ZUF \qquad (51)$$

gewählt. In der DYNAMO-Sprache wird dieser Zusammenhang durch die Makrofunktion

$$PLEV.K = SMOOTH(ZUF.JK, SMK) \qquad (52)$$

beschrieben.[15)]

14) Forrester verwendet zur Spezifikation der exponentiellen Glättungsprognose diese Smoothkonstante (SMK) und nicht die übliche Glättungskonstante (GLK). Die Smoothkonstante entspricht dem Kehrwert der Glättungskonstante.

15) Wie man erkennt, ist der echte Zufluss zu dem Prognoselevel (46) der die Zuflussrate einer Beobachtungsgröße darstellt, daher gar nicht ZUF sondern ZUF_1 in (47) Damit ist die Interpretation der exponentiellen Glättung als eine Level-Raten-Deutung nicht möglich und Forresters Level-Raten-Interpretation der Welt

Auch diese Makrofunktion eines Smooth-Levels hat Forrester genau wie die Delay3-Verzögerungslevel ursprünglich zur Durchführung seiner Testantwortanalyse generiert. Daher hat er in der von ihm definierten Makrofunktion den Anfangswert des Levels PLEV wiederum so gewählt, dass ein Prognosegleichgewicht zustande kommt, d. h., es müssen im Gleichgewicht die Prognosewerte PLEV.K den Prognosewerten der Vorperiode, d. h. PLEV.J, entsprechen.

Diese Anfangswertbestimmung ist in der von Forrester generierten Smooth-Makrofunktion enthalten. Diese Smooth-Makrofunktion wird aber auch von Meadows für sein Weltmodell, d. h. für ein Wachstumsmodell, verwendet.

Die Verwendung einer Smooth-Makrofunktion wäre wie bei den Delay3-Makrofunktionen zur Beschreibung der Delay3-Verweilzeithypothesen aber nur dann akzeptabel, wenn alle Variablen, die den Zufluss ZUF.JK einer Smooth-Makrofunktion in einem Modell beeinflussen, sich vor 1900 in einem Gleichgewichtszustand befänden hätten, was definitiv nicht der Fall war.

Betrachtet man nunmehr die gesamten Beziehungen in dem Meadows-Modell, dann müssten aufgrund der verwendeten Smooth- und Delay3-Level die Beobachtungswerte sämtlicher in dem Modell beschriebenen Variablen vor 1900 einen konstanten (gleichgewichtigen) Verlauf besessen haben, wenn die Level-Anfangswerte in den Delyay3- und Smooth-Makrofunktionen den Beobachtungsbefunden entsprechend gewählt worden wären. Das Meadows-Modell arbeitet daher mit Anfangswerten in den Smooth- und Delay3-Levels, die völlig der Realität widersprechen.

Das Modell enthält neun „normale Level", die wie die Bevölkerungsbestände durch Levelgleichungen der Form (1) explizit von Meadows formuliert wurden, aber sechzehn Levelgleichungen werden im Rahmen der verwendeten vier Smooth- und vier Delyay3-Level „Systemintern" definiert und mit „falschen" Anfangswerten (nämlich Gleichgewichtswerten) belegt.

Diese ausführliche Erörterung des Status der Levelanfangswerte in den Makrofunktionen des Weltmodells von Meadows war notwendig, um die Defizite in der Diskussion zwischen Meadows sowie Cole und Curnow beurteilen zu können.

Cole und Curnow haben offenbar nicht erkannt, dass die Levelwerte in den Makrofunktionen von einem Gleichgewichtszustand ausgehen. Denn dieser Befund wird von ihnen nirgendwo erwähnt. Er ist aber wichtig für die weitere Argumentation von Meadows gegen die Vornahme einer Retrodiktion.

Meadows trägt neben dem erwähnten Einwand der numerischen Unzulänglichkeit einer Retrodiktion einen zweiten Einwand gegen die Durchführung einer Retrodiktion vor, der bereits als Einwand der Unzulänglichkeit der Anfangswerte bezeichnet wurde. Er behauptet, dass „*disequilibra introduced through the assignment of initial values may insert transients in the models behaviour which cannot be produced in the reverse direction*.**"**

Cole und Curnow erwidern auf dieses von Meadows in ihrem Nature Artikel angeführte Zitat: „*The assignment of initial values can cause confusion in dynamic models ... Inconsistency*

ist nicht ganz konsistent. Diese Inkonsistenz des Forresterschen Level-Raten-Paradigmas gefährdet aber nicht die Anwendung solcher Prognoselevel.

between the initial values given to the parameters of a dynamic model and a set of equations which link them may arise"

Damit antworten sie aber gar nicht auf Meadows Einwand, sondern behaupten ohne eine weitere Begründung, dass Anfangswerte in einem dynamischen Modell Konfusionen (confusions) auszulösen vermögen. Was unter Konfusionen zu verstehen ist, wird nicht beschrieben.

Dafür sind aber ihre Ausführungen über „parameters“ und „initial values“ eines dynamischen Modells selbst etwas konfus. Bei einem dynamischen Modell ist zwischen den Anfangswerten der Zustandsvariablen (hier der Levelvariablen) und den Hypothesenparametern, die in den Raten- und Hilfsgleichungen von System Dynamics Modellen auftreten, zu unterscheiden. Anhand der Hypothesenparameter werden für alle zukünftigen Perioden die Variablenwerte der jeweiligen Periode bestimmt. Wenn Cole und Curnow von den „*initial values given to the parameters of a dynamic model*“ sprechen, unterscheiden sie aber nicht zwischen diesen beiden Arten von Parametern. Denn bei ihrer Begriffsbildung gibt es auch „initial values“ der Hypothesenparameter. Was sind dann die „non initial parameters“ im Falle von Hypothesenparametern und wieso können „inconsistencies“ zwischen Hypothesenparametern auftreten?

Kurzum: Cole und Curnow haben offensichtlich nicht erkannt, dass Meadows nur die Anfangswerte der Levelvariablen meinen kann, weil die übrigen Parameter, d. h. die Hypothesenparameter, nicht als Anfangswerte bezeichnet werden können.

Damit wenden wir uns Meadows zweiten Einwand gegen eine Retrodiktion, d. h. dem Einwand der Unzulänglichkeit der Anfangswerte, zu.

Meadows argumentiert hier „systemtheoretisch“, wenn er von einem Ungleichgewicht (disequilibra) spricht, welches dazu führt, dass die **„***transients in the models behaviour*“ nicht in die rückwärtige Richtung möglich ist. Mit den Termen „Ungleichgewicht“ oder dem „transientes Verhalten eines Modells in die eine oder andere Richtung“ kann man aber nichts anfangen, weil nicht zu erkennen ist, wie solche nicht weiter erläuterten Begriffe im Lichte der Lösung des simultanen Gleichungssystems (4) zu interpretieren sind.

Entscheidend für die ganze Frage ist nur: Es liegt ein Differenzengleichungssystem erster Ordnung der Form (2) vor, welches man durch Lösung des simultanen Gleichungssystems (4) „nach hinten rechnen“ oder retrodizieren kann. Dabei stellt sich die Frage: Haben bestimmte Konstellationen der Levelanfangswerte einen Einfluss auf die Retrodiktion? Sie hätten nur dann einen Einfluss, wenn man wegen dieser Levelanfangswerte das nichtlineare Gleichungssystem (4) nicht eineindeutig lösen könnte.

Auf dieser Ebene eines zu lösenden simultanen nichtlinearen Gleichungssystems bewegt sich Meadows aber nicht im Rahmen seines Einwandes.[16)] Aus dieser Sicht stößt Meadows Einwand, unzulängliche Anfangswerte würden Retrodiktion nicht zulassen, ins Leere.

Meadows ist sich bewusst, dass auch in den Verzögerungsmakros Levelanfangswerte enthalten sind, denn er bemerkt zusätzlich: „*delayed relationships will also be asymmetric in time*“, was dazu führt, dass seiner Meinung nach eine Retrodiktion „*completely meaningless*“ ist. Das trifft aber, wie erwähnt, im Lichte der erforderlichen Lösung des simultanen nichtlinearen Gleichungssystems (4) nicht zu.

Cole und Curnow antworten auf diesen Einwand, dass man auch Delyay3-Verzögerungen zurückrechnen kann „*by making the sign of the time increment negativ*“. Das trifft zwar zu,

16) Das Gleiche gilt aber auch für Cole und Curnow.

denn die expandierten Makrofunktionen enthalten ja wie beschrieben auch Levelgleichungen der (38), (40), (42) und (50) mit dem Zeitinkrement DT, welches im Rahmen der Expansion der Levelgleichungen der Makrofunktionen in DYNAMO negativ gesetzt wird. Allerdings erweist sich dieses DT-Minus-Verfahren, wie beschrieben, nur als erster Schritt des Iterationsverfahrens zur Lösung des simultanen Gleichungssystems (4).

Cole und Curnow haben mit ihrem DT-Minus-Verfahren gezeigt, dass man damit ein Modell im Prinzip rückrechen kann. Sie haben diese Analyse aber nicht aus der Sicht vorgenommen, dass man eine umfassende Rückrechnung nur auf der Basis eines nichtlinearen simultanen Gleichungssystems vornehmen kann. Auf dieser Grundlage hätten sie die mathematisch aufweisbaren Grenzen (keine eineindeutige Lösung) erkannt und auch erkannt, dass ihr Verfahren nur der erste Iterationsschritt im Rahmen einer Gauss-Seidel-Prozedur zur Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems darstellt. Weiterhin haben sie den gravierenden Defekt des gesamten Meadows-Modells nicht erkannt, der darin besteht, dass Meadows seine Verzögerungslevel mit Gleichgewichtsanfangswerten initialisiert hat, indem er die Forresterschen Makrofunktionen verwendet, die dieser aber zur Durchführung einer Testantwortanalyse entwickelt hat. Damit wären die beiden Einwände von Meadows, die seiner Meinung nach dazu führen, dass eine Retrodiktion „*completely meaningless*“ sei, ausgeräumt.

Zugleich zeigt sich aber, dass das Weltmodell von Meadows wegen seiner gleichgewichtigen Anfangswerte der Smooth- und Delay3-Makrofunktionen nicht den Standards einer wissenschaftlich begründeten Prognose entspricht, weil es von evidentermaßen falschen faktischen Behauptungen ausgeht.

(R03-28-06-15)