29.06.98

B. Hassenstein:

Der Schluß von Reiz-Reaktions-Funktionen auf Datenverarbeitungs-Strukturen: Lehren aus Lösungsstrategien für ein Modellproblem.[x)]

A. Rückschau auf ein Jubiläum: 50 Jahre Kybernetik.

B. Vorgeschichte zum Thema des Vortrags.

C. Das "Modellproblem" und seine Lösungen.

A. Rückschau.

Der Begriff Kybernetik ist - wenn man sich an das Datum der Veröffentlichung hält - gerade 50 Jahre alt. Norbert Wieners Buch "Cybernetics" erschien in den USA 1948. Sein Untertitel lautete: Control and Communication in the animal and the machine.

Die Theorie der Kybernetik umfaßte von Beginn an zwei Problembereiche:

- Aus einer gegebenen Struktur der Datenverarbeitung deren Systemfunktionen herzuleiten. Ein Beispiel aus Tübingen: Werner Reichardt, Deszö Varju und Kuno Kirschfeld veröffentlichten in den ersten Bänden der Zeitschrift Kybernetik mehrere Arbeiten über die Systemerscheinungen der lateralen Inhibition.
- Die inverse Problemstellung lautet: Gegeben seien die Systemerscheinungen eines unbekannten Wirkungsgefüges: Herzuleiten ist die funktionelle Struktur des Wirkungsgefüges. Diese Fragestellung hat das Team aus Werner Reichardt und mir aufgegriffen. Die Veröffentlichung über die Prinzipien (die Axiomatik) dieses theoretischen Ansatzes erschien 1953 hier in Tübingen in der "Zeitschrift für Naturforschung" unter dem Titel: Der Schluß von Reiz-Reaktions-Funktionen auf Systemstrukturen.

Angewandt haben Werner Reichardt und ich unsere Fragestellung auf meine Messungen über die Bewegungsintegration durch das Auge und Gehirn des Käfers Chlorophanus viridis.

---

x) Vortrag am 19.03.1998 in Tübingen auf der Jahrestagung der Gesellsch. f. physikal. Biologie.

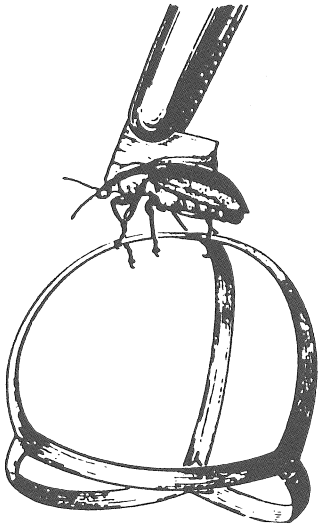


Abb. 1

3 Jahre später veröffentlichten wir die mit aller mathematisch-logischen Raffinesse und Akkuratesse nach den Prinzipien "hinreichend und notwendig" ermittelte Struktur der Datenverarbeitung. Diese Datenverarbeitungs-Struktur ist jüngst auch zum Symbol der immer noch auf der Welt führenden Zeitschrift für biologische Kybernetik geworden, damit also auch die theoretische Fragestellung: Der Schluß von Reiz-Reaktions-Funktionen auf die als Funktionsschaltbild aufzuzeichnenden Systemstrukturen.

B. Vorgeschichte.

Insgesamt knapp 12 Jahre dauerte - wenn auch mit jahrelangen Unterbrechungen - vom Beginn meiner Messungen über die Veröffentlichung des Korrelationsprinzips durch W. Reichardt (1957) die Arbeit am Bewegungssehen von Chlorophanus, wobei in den letzten Jahren auch Deszö Varju an der theoretischen Arbeit entscheidend mitwirkte.

Da ereignete sich folgendes: Gernot Wendler, damals Doktorand von Horst Mittelstaedt in Seewiesen, hielt im wissenschaftlichen Kolloquium des Zoologischen Instituts München auf Einladung von H.J. Autrum ein Referat über das Bewegungssehen von Chlorophanus viridis; so etwas war damals üblich. Er muß das ausgezeichnet gemacht haben; denn - wie mir berichtet wurde - Autrum verstand jetzt das Prinzip der Korrelationsauswertung sofort, erkannte die überzeugende Einfachheit des Funktionszusammenhangs der Korrelationsauswertung, aber quittierte das dann mit folgender Bemerkung: Er verstände gar nicht, wieso Hassenstein und Reichardt so viele Jahre gebraucht hätten, um so etwas Einfaches herauszubekommen.

Als ich das hörte, war ich verblüfft und konsterniert. Natürlich konnte Autrum nicht wissen, aber er hätte doch ahnen können, einen wie riesigen Aufwand an Experimenten und theoretischer Arbeit es gekostet hatte, um dieses Ergebnis zu gewinnen und es schließlich hieb- und stichfest abzusichern. Daraus, wie einfach und klar verständlich eine Problemlösung ist, läßt sich doch nicht ablesen, wie schwierig sie zu gewinnen war! Aber wie kann man das überhaupt jemandem klarmachen, der so etwas nicht selbst ein- oder mehrmals erlebt, sich selbst dabei beobachtet und das dann noch im Gedächtnis behalten hat?

C. Das "Modellproblem".

Ich suchte nach einem Beispiel, mit Hilfe dessen jedermann an sich selbst die Erfahrung machen konnte: Etwas theoretisch ganz Einfaches kann ganz schwer zu finden sein. Ich suchte also nach einem Beispiel, an dem man

- den Schwierigkeitsgrad des Findens der Lösung mit der
- Einfachheit der gefundenen Lösung

nach ungefähr dem gleichen Maßstab messen und womöglich quantitativ vergleichen konnte. Ich war natürlich unsicher, ob es so etwas überhaupt geben konnte; denn das Suchen einer Problemlösung ist ja etwas völlig anderes als die leichte oder schwere Verständlichkeit eines gefundenen Ergebnisses.

Wie sollte das Modellproblem beschaffen sein? Die Lösung sollte so einfach sein, daß sie ein Kind begreifen und anwenden können sollte. Das Suchen der Lösung aber sollte einerseits Spaß machen, andererseits aber "mittel schwierig" sein. Auch ein kluger Kopf sollte die Lösung nicht trivial finden, er sollte sich schon ein Weilchen anstrengen müssen. Die Aufgabe durfte wiederum nicht so schwierig sein, daß das Knobeln zur Qual wurde, zu viel Zeit verschlang und in zu vielen Fällen zum erfolglosen Abbrechen führte.

Ich stelle Ihnen jetzt mein Modellproblem vor: Ein erdachtes Daten-Verarbeitungssystem habe drei Eingänge und einen Ausgang. Gemessen oder beobachtet seien 12 Eingangs-Ausgangs-Funktionen.

3,7,5 → 4	9,7,2 → 8	9,3,6 → 5
7,7,7 → 2	8,4,8 → 4	2,9,9 → 9
8,2,6 → 7	9,3,9 → 6	4,5,3 → 3
3,4,8 → 4	7,2,3 → 5	8,7,3 → 5

Gesucht ist die Datenverarbeitung bzw. Systemstruktur bzw. das Bildungsgesetz, das die Eingangs- mit den Ausgangsdaten verbindet.

Bisher sind 32 Protokolle eingegangen und ausgewertet worden. Die Auswertung wurde durchgeführt von Herrn Dipl.math. Max Neunhöffer (Aachen). Von 32 Protokollanten haben 27 die Aufgabe gelöst. 5 Protokollanten ist das nicht gelungen, sie haben aber trotzdem einen Bericht gesandt. Angegeben wurde auch die gebrauchte Zeit: Die Rekordzeit betrug 2 min, die Maximalzeit 3 Stunden. Der Median betrug 15 min, der Durchschnitt 31 min.

Die Lösung besteht aus zwei Sätzen:

Addiere die beiden größten Zahlen und
dividiere sie durch die kleinste!

Dies setzt 4 Denkvorgänge voraus: Größenvergleich, Auswahl, Additi . und Division.

Jetzt aber kam die riesige Überraschung: Trotz mathematisch identischen Lösungen waren die Denkwege, die zu ihr führten, unglaublich verschieden. Max Neunhöffer notierte 80 in den Protokollen vorkommende unterschiedliche Denkvorgänge, verglichen mit den 4 Denkvorgängen der Lösung also das 20fache; von diesen 80 kamen 26 zwei oder mehrmals in den Protokollen vor, 54 aber nur in einem einzigen.

Unterschiedlichkeiten der Lösungswege prägten sich aus: in den Beobachtungen, in Folgerungen aus Beobachtungen, im methodischen Ansatz und in Lösungsideen. Hierfür folgen jetzt einige Beispiele aus eingesandten Protokollen:

Beobachtungen:

- Alle Zahlen einstellig.
- Null und eins kommen nicht vor.
- Unter den Ergebnissen sind die mittleren Zahlen zwischen 4 und 7 häufiger als die "extremen".
- Eng beieinanderliegende Eingangszahlen ergeben kleinere Ergebnisse, weiter gestreute: größere.
- Es gibt ein Beispiel, wo aus drei geraden Zahlen eine ungerade berechnet wird.

Folgerungen aus Beobachtungen:

- Wegen des Bereichs der Ergebnisse muß sowohl eine vergrößernde wie eine verkleinernde Operation vorkommen.
- Wenn 0 nicht als Ergebnis vorkommt, wird vermutlich dividiert.

- Aus Ganzzahligkeit folgt: Wurzeln, Quadrate etc. unwahrscheinlich, aber auch Quotienten!
- Ergebnis nie größer als größte Zahl: Division wahrscheinlich.
- Ergebnis nie 0 oder 1, also keine Modulo-Funktion.

Methoden:

- Setze an bei auffälligen Tripeln, vor allem 7,7,7→ 2 und solchen, wo eine Zahl doppelt vorkommt.
- Suche und betrachte Beispiele, bei denen dasselbe Ergebnis herauskommt. (4 und 5 kommen je dreimal vor, alle anderen Zahlen nur einmal).
- Suche nach möglichst einfacher Regel.
- Vielleicht geht Probieren doch schneller.
- Die Lösung wird etwas Überraschendes enthalten, produziere also unter diesem Gesichtspunkt Ideen!
- Überlege, was der Autor der Aufgabe gedacht hat!
- Suche nach einem Muster oder einer Struktur!

Lösungsideen, nach der Überprüfung wieder verworfen:

- Differenz zwischen größter und kleinster Zahl?
- Mittelwert zwischen zweien der Zahlen?
- Summe der absoluten Differenz aufeinanderfolgender Zahlen?
- Summe aller Differenzen?

Aus der Analyse der Protokolle zog Max Neunhöffer zahlreiche Folgerungen:

- Mehr Kenntnisse sind nicht immer ein Vorteil, damit verbunden sind nämlich auch mehr Irrwege.
- Häufig fanden beim Denken Entscheidungen aufgrund ungenügender Information statt: Indizien, Vermutungen.
- Es gibt "chaotische Phasen" (Produzieren gänzlich neuer Gedanken) und stärker zielgerichtete Phasen (Ableitungen aus Beobachtungen, Kombination bisheriger Ideen).
- Ideen erscheinen meist schlagartig und in Sprüngen, "plötzlich"; Ideen "kommen". Ein "Kristallisationsprozeß" geht vor sich.

In den Protokollen kommen auch typische Denkhindernisse vor:

- Vier Teilnehmer versuchten nur, die Kommata durch Operatoren zu übersetzen und übersahen die Möglichkeit "logischer" Operationen wie Vertauschung, Minimumbildung, Umordnung. Die meisten aber kamen aus dieser "Denksackgasse" wieder heraus.

Jetzt noch ein Sonderereignis:

- Am Abend nach flüchtigem Anschauen hatte der Problembearbeiter die Aufgabe zunächst beiseite gelegt. Am Morgen noch vor dem

Aufstehen fiel ihm spontan die Lösung ein, ohne daß er sich an ein einzelnes Zahlenbeispiel erinnerte oder über die Problematik nachdachte. Offenbar hat das Gehirn sich nachts unbewußt weiter mit dem Problem beschäftigt. Am Morgen war das Ergebnis da und konnte abgerufen werden.

Als die ersten erfolgreichen Lösungen der Aufgabe eingetroffen waren, und der Schwierigkeitsgrad, sie zu finden, deutlich wurde, erhob sich erneut die Eingangsfrage: Läßt sich auch die Einfachheit der Lösung demonstrieren und womöglich mit der Schwierigkeit der Lösungsfindung vergleichen?

In der Tat gibt die gestellte Aufgabe dazu die Möglichkeit, und zwar indem man sie umstellt: Es werden nicht die 12 Zahlenblocks und die Ergebnisse gegeben, und die Methode ist zu finden, sondern es werden die Zahlenblocks und die Methode angegeben, und die Ergebnisse sind zu finden.

Zähle jeweils die beiden größten Zahlen zusammen und teile das Ergebnis (die Summe) durch die dritte Zahl.

3,7,5 →	7,7,7 →
8,2,6 →	3,4,8 →
9,7,2 →	8,4,8 →
9,3,9 →	7,2,3 →
9,3,6 →	2,9,9 →
4,5,3 →	8,7,3 →

Diese Aufgabe kann man einer Schulklasse geben und die Zeit messen, die zur Ausrechnung gebraucht wird. Das Ergebnis, erhoben von Herrn Studiendirektor Hans-Dieter Baumgärtner in der ersten Klasse eines Gymnasiums, also bei 10 bis 11jährigen Schülern, lautete: Sie brauchten im Mittel etwa 1 1/2 min, also weniger als ein Zehntel der Zeit, die von denjenigen Erwachsenen gebraucht wurde, die aus den Zahlen und den Ergebnissen die Verrechnungsweise zu ermitteln versuchten.

Schlußgedanken.

Nehmen wir an, jedes der 12 Zahlentripel war das Ergebnis je einer physikalischen oder biologischen Messung an einem und demselben unbekannten System; dann wäre allen, die das Problem lösten und den Vorgang der Datenverarbeitung entschlüsselten, dies ohne Anwendung von Statistik gelungen. Die Meßdaten bildeten ja auch keine homogene Grundgesamtheit; also fehlte die elementare Voraussetzung für die Anwendung einer statistischen Methode. Trotzdem kam ein Ergebnis zustande, an dem nicht zu rütteln ist. Das ist einerseits trivial. Andererseits kann mancher ein Liedchen über Referenten und Gutachter singen, für die große Zahlen und statistische Methoden das entscheidende Kriterium für wissenschaftliche Dignität sind.

Die beiden Aufgaben,
- die Lösung zu finden und
- die Lösung zu verstehen und richtig anzuwenden,

erwiesen sich als prinzipiell unterschiedlich: Bei der Problemlösung handelte es sich schwerpunktmäßig um intuitives Denken, beim Verstehen und Anwenden der Lösung um diskursives Denken in logisch vorgegebenen Bahnen. Für die intuitiven Denkvorgänge finden sich in den Protokollen zahlreiche kennzeichnende Formulierungen. Immer wieder wird das Erlebnis der Lösungsfindung so gekennzeichnet: Die Lösung "stellte sich ein .."; mir war, als ob etwas "auf mich zukommt". Die Lösung stellte sich ein, "als der Wille zur Erkenntnis ausgeschaltet war". Immer wieder war das Herausspringen aus einer gerade befahrenen Denkbahn entscheidend. Was zur Lösung des Problems führte, war also nicht nur kein statistisches Verfahren, sondern geradezu das Gegenteil davon: Produktive Phantasie, deren Ergebnisse diskursiv überprüft wurden.

Somit läßt sich das Fazit ziehen: An einem kleinen Modellbeispiel offenbarte sich eine erstaunliche Vielfalt von geistigen Prozessen, so wie sie auch in der großen bunten Welt der wissenschaftlichen Forschung vielfach bestimmend sind.