

Grenzen des Systems Engineering

Dieter Scheithauer

H·I·T·S Engineering, Dr.-Ing. Dieter Scheithauer
Breitensteinstraße 26, 83727 Schliersee, dieter.scheithauer@hitseng.eu

Keywords: *Komplexität, Logik, Funktionstheorie, Kreativität*

Zusammenfassung: Die geologischen und biologischen Kreisläufe schaffen eine irdische Biosphäre und stellen dem Leben auf der Erde begrenzte Ressourcen zur Verfügung. Technischer Fortschritt nutzt diese Ressourcen, um die menschlichen Lebensbedingungen in vielerlei Hinsicht zu sichern und zu verbessern. Dabei werden immer wieder Konsequenzen menschlichen Handelns sichtbar, die die Aufrechterhaltung des Erreichten in Frage stellen und der Menschheit schlimmstenfalls die Existenzgrundlagen entziehen können. Bei allem Vertrauen in die Fähigkeiten, Probleme zu erkennen und zu lösen, stellt sich dennoch die Frage, wo die Grenzen menschlicher Erkenntnisfähigkeit und Innovationskraft liegen. Im Systems Engineering herrscht das Selbstverständnis vor, für Lösungen komplexer Problemstellungen unverzichtbar zu sein. Entsprechend ist eine Beschäftigung mit der Frage nach den Grenzen des Systems Engineering essentiell für besonnenes und verantwortungsvolles Handeln.

1 Einleitung

Vor fünfundsiebzig Jahren veröffentlichte Warren Weaver, Mathematiker und Wissenschaftsadministrator der Rockefeller Foundation, ein populärwissenschaftliches Essay mit dem Titel „Science and Complexity“ [1]. Im Text prophezeite er einen zukünftigen technischen Fortschritt dank multidisziplinärer Zusammenarbeit („mixed-team“) und Computertechnik („new types of electronic computing devices“). Heute wissen wir, er hatte Recht. Hinsichtlich der multidisziplinären Zusammenarbeit referenzierte er die Erfahrungen aus dem Zweiten Weltkrieg mit der Organisation eines möglichst effizienten transatlantischen Nachschubs unter der Bedrohung feindlicher Angriffe, die zu den Disziplinen Operational Analysis (Großbritannien) beziehungsweise Operations Research (USA) führten. Operations Research, das auf die Nutzung fokussierte, war ein erster Schritt in Richtung einer vollumfänglichen Lebenszyklusbetrachtung, wie sie dem Systems Engineering zugrunde liegt. Seine Hoffnung hinsichtlich Computertechnik speiste sich offensichtlich aus seiner beruflichen Rolle im industriell-militärisch-akademischen Komplex, der sich in den USA in Zeiten der rüstungsbezogenen Kriegswirtschaft im Zweiten Weltkrieg herausbildete.

Seine Argumentation fußt auf einer Differenzierung in einfache Systeme, Systeme organisierter Komplexität und Systeme desorganisierter Komplexität. Einfache Systeme sind beherrschbar im Sinne einer nahezu vollständigen Analyse und zuverlässigen Verhaltensprognose. Für ihn fielen darunter Zweikörpersysteme als mechanisches Beispiel. Alle Mehrkörpersysteme höherer Ordnung kategorisierte er als Systeme organisierter Komplexität. Die

Grenze zwischen den beiden Kategorien muss man sich im Rahmen des von ihm prophezeiten Fortschritts wohl als flexibel denken, da uns heute auch viele Mehrkörpersysteme höherer Ordnung als beherrschbar gelten. Als Beispiel für Systeme desorganisierter Komplexität führt er die statistische Mechanik an, in denen die individuellen Wechselwirkungen nur als Weißes Rauschen wahrgenommen werden, aber emergente Aussagen wie Druck und Temperatur über die Gesamtheit getroffen werden können. Eine Orientierung an dieser Einteilung ist auch fünfundsiebzig Jahre später für eine Untersuchung der Grenzen des Systems Engineering sinnvoll.

2 Welche Grenzen?

Mancher Leser mag sich diese Frage ganz generell stellen, womit wir bei einem Grundkonflikt der abendländischen Neuzeit angelangt sind. Zunehmender allgemeiner Wohlstand im Hochmittelalter bot Bildungs- und Entwicklungschancen auch abseits des Klerus. Die emanzipatorischen und egalitären Gesellschaftsmodelle der Reformationszeit erlaubten zwei Lösungen: Alle sind so gottgleich, wie vom katholischen Klerus beansprucht, oder niemand. Die erste Position wurde von Johannes Calvin und, noch radikaler, von Ulrich Zwingli vertreten. Sie lebt als Anspruch auf absolutes Wissen bis heute fort. Die Gegenposition bezog Martin Luther, was in der Phrase „nur die Gnade Gottes“ am pointiertesten zum Ausdruck kommt.

Schon Sokrates gelangte zu der paradoxen Erkenntnis: „Ich weiß, dass ich nichts weiß.“ Bei Beantwortung einer Warum-Frage ergeben sich schnell wieder ein Dutzend neue Warum-Fragen. Am anderen Ende der Selbstreflektionsskala gilt übrigens: „Ich habe davon keine Ahnung, es muss trivial sein“ (Ivan A. Krylov) oder vornehmer ausgedrückt im logischen Ignoranzgebot Ludwig Wittgensteins: „Worüber man nicht reden kann, kann man nur schweigen“.

Für weltanschauliche Lutheraner mag die weitere Argumentation hilfreich sein. Bei weltanschaulichen Calvinisten ist Missvergnügen nicht auszuschließen. Auf alle Fälle soll dieser Text zum Nachdenken anregen.

3 Die Versuchung schwacher Korrelationen

Die Differenzierung zwischen Systemen organisierter und desorganisierter Komplexität zieht eine strikte Grenze hinsichtlich der mathematischen Modellierung. Reale komplexe Systeme setzen sich häufig aus geordneten und chaotischen Anteilen zusammen. Das einfachste Beispiel ist das Vorhandensein hochfrequenten Messrauschens, das in Relation zum Frequenzspektrum der Nutzsignale als Weißes Rauschen modelliert werden kann. Mittels stochastischer Analysen lässt sich die Validität dieser Hypothese überprüfen. Resultierendes farbiges Rauschen weist im Gegensatz auf Fehler hin, die vielfache Ursachen haben können: fehlkalibrierte Messgeräte, schlecht synchronisierte Messungen, abweichende Modellparameter oder unpassende Modellstrukturen [2]. Es liegt nahe, Korrelationsanalysen ganz allgemein zur Mustererkennung in großen Datenmengen einzusetzen, um innere Zusammenhänge zu

entdecken und Systemmodelle zu entwickeln oder zu verbessern. Im Fall starker Korrelationen gelingt dies in der Regel recht gut.

Bei schwachen Korrelationen ist Vorsicht geboten, da die Signifikanz wegen des geringen Pegelabstandes von Nutz- und Rauschsignalen reduziert ist. Zur Signifikanzsteigerung wird häufig versucht, den Effekt hochzuskalieren, dann daraus Schlüsse zu ziehen, und diese Schlussfolgerungen anschließend wieder auf realistische Größenverhältnisse herunterzuskalieren. Das methodische Problem liegt in einer möglichen Diskrepanz zwischen der Einfachheit der für die Skalierung benutzten Modelle und der Erfahrungstatsache, dass schwache Korrelationen auf äußerst komplexe Systemzusammenhänge hindeuten. Schlussfolgernd lässt sich urteilen, dass schwache Korrelationen in Zusammenhang mit unterkomplexen Skalierungsmodellen ein hohes Potential für pseudowissenschaftliche Erkenntnisse bieten.

4 Vom λόγος zur Formalen Logik

Die etymologische Verbindung des griechischen λόγος und unserer heutigen Logik ist offensichtlich. Dass wir beide Begriffe für bedeutungsnäher halten, als sie es in inhaltlichen und historischen Kontexten tatsächlich sind, liegt an der Methodik der philosophischen Wissenschaft: Würdigung oder Verwerfung überlieferten Wissens längst verblichener Denker gemessen am heutigen Erkenntnisstand. So gilt heute vielen Demokrit als erster Kernphysiker. Bezogen auf Logik findet sich Aristoteles weitaus berechtigter in einer äquivalenten Rolle wieder.

Die große Bedeutung der antiken griechischen Kultur gründet auf materiellem Wohlstand, einer hohen gesellschaftlichen Dynamik und der Entwicklung einer bis heute fortwirkenden Schriftkultur. Die Erfindung der ersten phonetischen Vokalschrift erleichterte die Alphabetisierung. Papyrus als wichtiges ägyptisches Exportgut förderte die Entwicklung neuer, auf Papyrus konservierbarer Literaturformen jenseits in Stein gravierter Sinn- und Orakelsprüche (Heraklit) und mündlich vorgetragener epischer Dichtung (Homer): Lyrik (Sappho), die Theaterformen Tragödie (Aischylos, Sophokles, Euripides) und Komödie (Aristophanes), Rhetorik (Isokrates), Dialektik (Platon) und Sachprosa (Aristoteles).

Im Organon definiert Aristoteles die Produktionsbedingungen für Sachprosa: Syllogistik und Kategorienlehre. Ob Aristoteles darüber hinaus beanspruchte, die Bedeutung des λόγος im Organon zu formalisieren, bleibe hier dahingestellt. Tatsache ist, dass wissenschaftliches Arbeiten heute identisch ist mit logischem Schlussfolgern und der Produktion von Sachprosa. Die Bedeutung der Kategorienlehre darf dabei nicht unterschätzt werden. Der aristotelische Ansatz von zehn globalen Kategorien, die über alle Fachgebiete hinweg gültig sind, ist einer großen Variabilität von anwendungsspezifischen Konventionen, Standards und Normen gewichen, die einen jeweiligen kategorischen Referenzrahmen setzen, um Prosa Sachprosa werden zu lassen. Am Organon stört, dass es keine Lösung für das sogenannte Induktionsproblem bietet. Die Syllogistik definiert zwar Regeln für das Schlussfolgern, aber kann keine Wahrheit generieren, wenn die Anfangsaussagen nicht wahr sind. Immanuel Kant nahm deshalb ein Wissen a-priori an, in dem unabdingbare Wahrheiten kristallisiert sein müssen.

Im neunzehnten Jahrhundert führte eine intensive Auseinandersetzung mit den klassischen griechischen Texten zur Entwicklung der Formalen Logik, vor allem durch Gottlob Frege. Georg Cantor entwickelte die Mengenlehre auf Basis logischer Prinzipien. Das Postulat von einem begrenzten Satz klar definierter, a-priori als gültig angenommener Axiome, wie in der Euklidischen Geometrie vorgezeichnet, milderte das Induktionsproblem ab. David Hilbert forderte generell eine Axiomatisierung der Wissenschaften und legte selbst einen Satz von Axiomen zur Arithmetik vor. Die Axiome bilden nicht notwendigerweise letzte Wahrheiten ab, sondern sind Teil des kategorischen Referenzrahmens eines Fachgebiets. In der Principia Mathematica begründeten Alfred North Whitehead und Bertrand Russell die Arithmetik auf der Basis rein logischer Axiome [3].

Beschreibt nun Logik die Grenzen menschlicher Erkenntnisfähigkeit? Das Fehlen des Konzeptes von freien Variablen und das Scheitern an Henne-Ei-Problemen mit ihrer gegenseitigen Bedingtheit lassen berechnete Zweifel aufkommen.

5 Die Erzählstruktur mathematischer Funktionen

Um in unserer Fragestellung weiterzukommen, brauchen wir einen neuen Ansatz zur Bewertung der Logik. Die Anthropologie hat mittlerweile eine Antwort auf die Frage gefunden, was den Menschen zum Menschen macht und von anderen Lebewesen unterscheidet: Es sind die argumentativen Sprachfähigkeiten. Nur Menschen sind in der Lage, auf Warum-Fragen argumentative Antworten zu geben. Dies führt zu Vorteilen in der zwischenmenschlichen Kommunikation und letztlich im Wechselspiel mit verbessertem Sozialverhalten zu einem evolutionären Vorteil [4]. Es ist also geboten bei der Sprache anzusetzen. Die moderne Sprachphilosophie versucht Sprache allerdings auf Logik zurückzuführen [5] – es handelt sich schließlich um eine Wissenschaft. Dieser Weg scheidet wegen des damit verbundenen Zirkelschlusses für uns aus.

Einen geeigneteren Ansatzpunkt bildet die allgemeine Erzählstruktur „dann ... und dann ... und dann ...“. Die „danns“ sind als kausale Beziehungen gemäß David Hume interpretierbar – grob gesagt Logik plus Zeit: Die Ursachen liegen zeitlich vor den Folgen [6]. Seitenerzählungen in den kausalen Reihungen reduzieren die argumentative Stringenz und die Merkbarkeit [7]. Allgemeine Erzählstruktur und Logik erfüllen die Randbedingungen an Funktionen: Eingangswerte – Prämissen oder Axiome – werden in einem internen funktionalen Zusammenhang von Zustandsgrößen, optional in Abhängigkeit freier Variablen, in Ausgangswerte transformiert. Die Theoreme der Funktionstheorie gelten, wenn die Eingangswerte selbst nicht von den Ausgangswerten abhängig sind oder diese Abhängigkeit in praktischen Fällen vernachlässigt werden kann. Die Funktionstheorie eignet sich so hervorragend als kategorialer Referenzrahmen für die weiteren Untersuchungen.

Zunächst betrachten wir die Arithmetik als axiomatisch rein logisch begründete formale Sprache. Die erste Feststellung führt uns zu der Erkenntnis, dass Ordnung und Chaos sich in Systemen mit organisierter Komplexität nicht nur überlagern, sondern miteinander verschränkt sind. Die Existenz von Primzahlen folgt aus den Sätzen der Arithmetik. Es lässt sich aber keine Formel für die Folge der Primzahlen angeben, was heute auf numerischem

Weg als bewiesen gilt. Ähnlich erschrocken waren schon die Pythagoräer hinsichtlich Quadratwurzel und Kreiszahl Pi. Die nächste Erkenntnis betrifft Kurt Gödels Unentscheidbarkeitssätze [8], die verallgemeinert aussagen: In rein logischen Sprachen können Sätze formuliert werden, deren Gültigkeit oder Nichtgültigkeit in demselben Sprachraum nicht bewiesen werden können, eine Erkenntnis, die wir in diesem Kapitel schon vorausgehend berücksichtigt haben.

Für die weitere Analyse erweitern wir den Sprachraum der Arithmetik und lassen komplexe Zahlen und freie Variablen zu, so dass Kausalität nach David Hume abgedeckt ist. Für diesen Sprachraum entwickelte Norbert Wiener mit seiner Feedback-Theorie eine Lösung zur Modellierung wechselseitiger Abhängigkeiten [9]. Vorwärts- und Rückführungspfade sowie der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen erfüllen jeweils die Kausalitätsbedingungen nach Hume zulasten einer Erhöhung der inneren funktionalen Komplexität. Damit eröffneten sich Modellierungsmöglichkeiten im Rahmen der Funktionstheorie, die Ludwig van Bertalanffy euphorisch zu der Vision veranlassten, die Welt insgesamt durch partielle Differentialgleichungssysteme modellieren zu können [10]. Funktionstheoretisch bedeutet dies aber, dass es keine externen Eingangsgrößen mehr gibt und sämtliche Dynamik durch die Anfangsbedingungen determiniert ist. Das verträgt sich nicht wirklich mit den uns bekannten evolutionären Emergenzen, die sich nachweislich nicht zum gleichen Zeitpunkt ereignet haben: vor allem die Existenz einer physikalischen Welt, die Entstehung sich selbst reproduzierender, in ihrem Lebenskontext autonom handelnder Organismen sowie die Fähigkeit, die eigenen Existenzgrundlagen jenseits eigener sinnlicher Wahrnehmungen zu ergründen.

6 Auswirkungen

Weltanschauliche Calvinisten mögen jetzt einwenden, natürlich gebe es irgendwelche Erkenntnisgrenzen, aber von diesen seien wir noch weit entfernt. Wir müssen uns nur bemühen, aus guten Intentionen heraus gute Werke zu vollbringen. Betrachten wir unsere größte Herausforderung, die Größe der menschlichen Population, deren Ressourcenverbrauch und die Erhaltung einer menschliches Leben unterstützenden Umwelt auszubalancieren, ist Skepsis angebracht. Schließlich ist schon heute mehr als ein Drittel Biomasse aller landlebenden Wirbeltiere in Menschen gebunden plus mehr als sechzig Prozent in domestizierten Nutztieren. Die menschliche Dominanz auf der Erde ist nicht zuletzt eine Folge unserer besonderen kognitiven Fähigkeiten. Wir müssen unsere Dominanz einhegen, um uns selbst und die Biosphäre insgesamt zu erhalten. Ein globales Biosphären-Engineering ist nicht machbar. Im Sinne der Systemtheorie ist die Biosphäre durch uns nicht (vollständig) beobachtbar. Einige Gegebenheiten und Zusammenhänge haben wir gut oder ansatzweise durchdrungen. Weite Teile sind uns aber in ihrer Existenz und ihren Auswirkungen völlig unbekannt. Ebenso ist Steuerbarkeit – also die Fähigkeit einen definierten Sollzustand der Biosphäre zu erreichen – angesichts menschlicher Vorstellungen von angemessenen Handlungszeiträumen mit für menschliche Technik akzeptierten hohen Wirkungsgraden fraglich. Die Evolution nutzt deutlich niedrigere Frequenzbereiche und gibt sich mit weit geringeren Wirkungsgraden zufrieden. Gesellschaftlicher und technischer Hyperaktivismus kann sich unter diesen Bedingungen schnell als kontraproduktiv erweisen. Stillhalten und

einfach so weiter machen ist aber auch keine sinnvolle Option. Eine wissenschaftsbasierte Vorgehensweise ist am besten geeignet, realistische Teilziele zu definieren, die mit absehbar beherrschbaren Risiken durch menschliches Handeln erreicht werden können. Die Willkür axiomatischer Setzungen und die destruktiven Folgen eines logischen Radikalismus sind dabei im Blick zu behalten.

Von agrartechnischen und agrochemischen Fortschritten können berechtigterweise Beiträge zur Lösung unserer globalen Probleme erwartet werden. Die wissenschaftliche Argumentation, wegen einer wachsenden Weltbevölkerung immer effizienteres Saatgut und wirksamere Pestizide zum Einsatz bringen zu müssen, um landwirtschaftlichen Flächenverbrauch und Beeinträchtigungen der Artenvielfalt zu minimieren, mag von der Agrarindustrie gern aufgenommen und verbreitet werden. Schließlich kann so ein betriebswirtschaftliches Wachstumsparadigma ökologisch nachhaltig unterfüttert werden. Im systemischen Kontext relativiert sich die Bedeutung dieser Argumentation beträchtlich. Das Hauptproblem verbirgt sich hinter der axiomatischen Setzung einer ständig wachsenden Weltbevölkerung. Allerdings ist eine Erkenntnisaussage, es leben zu viele Menschen auf der Erde, tabubehaftet. Ein reduktionistischer logischer Radikalismus deutet die Aussage um in: Daraus folgt, einzelnen Individuen das Existenzrecht absprechen zu müssen. Formal logisch betrachtet ist dies eine stärkere Schlussfolgerung als: Die Weltbevölkerung muss abnehmen. Formale Logik kennt eben keine freie Variable Zeit. Dabei wissen wir um eine praktikable Lösung, ohne die Menschenwürde zu verletzen: Bildung für alle plus niederschwelliger Zugang zu Empfängnisverhütungsmitteln plus gesellschaftlich garantierter sozialer Absicherung. Natürlich ist dies leichter hingeschrieben als global umgesetzt. Aber das Problem in den noch viel komplexeren Systemkontext der gesamten Biosphäre zu verschieben, ist noch irrsinniger. Das Beispiel zeigt auch, dass nachhaltige Wissenschaft auf offene Gesellschaftsformen angewiesen ist, um falsche gesellschaftliche Agendasetzungen zu vermeiden. Ein forciertes Vorantreiben der Elektromobilität bei massivem Ausbau der elektrischen Energieerzeugung aus fossiler Kohle wäre dann wohl unwahrscheinlicher.

7 Kreative Auswege

Wenn wissenschaftliche Erkenntnis statisch an kategorische Referenzsysteme gebunden wäre, die immer nur begrenzten Erkenntnisgewinn erlauben, bliebe wissenschaftlich-technischer Fortschritt jenseits reiner Kombinatorik Illusion, gäbe es keine menschliche Kreativität. Meistens wird Kreativität im Kontext von Problemlösungen thematisiert. Komplementär dazu ist Problemfinden ein mindestens gleichwertiger Aspekt von Kreativität [11]. Wahrnehmungspsychologisch ist Problemfinden immer mit einer Abweichung von einem kognitiven Referenzmodell verbunden, die Aufmerksamkeit erregt [12]. So steht die euklidische Geometrie als kategorisches Referenzmodell für das gesamte Weltall im Widerspruch zu physikalischen Beobachtungen. Die Aufhebung des Parallelenaxioms führt zu einer Aktualisierung des kategorischen Referenzmodells [13]. Diese Vorgehensweise ist heute als Falsifikationsprinzip ein fester Bestandteil der Wissenschaftstheorie [14].

Eine Erweiterung des Falsifikationsprinzips ergibt sich aus der erzähltheoretischen Erkenntnis: Über die gleichen Beobachtungen und Fakten lassen sich unterschiedliche Erzählungen

bilden. Dies bedeutet noch keine Beliebigkeit. So hätte die Genialität der aristotelischen Erfindung nicht philologie-historisch, sondern alternativ wahrnehmungspsychologisch begründet werden können. Ebenso könnten die vorgebrachten Argumente in einem Beispiel dem Nachweis dienen, dass allgemeine sprachliche Künstliche Intelligenz keine wissenschaftliche Sachprosa generieren kann. Falsifikationen erzähltheoretischer Art begründen einen Vorteil multidisziplinärer Zusammenarbeit: Welche fachspezifischen Erzählungen passen zueinander oder widersprechen sich? So lassen sich insbesondere ungeeignete axiomatische Setzungen und logische Radikalismen frühzeitig identifizieren.

Abschließend bleibt zu bemerken, dass Kreativität im Problemfinden und Problemlösen regelmäßig zur Sprachschöpfung führt, um neuartige Konzepte und Zusammenhänge begreifbar zu machen. So sind wissenschaftliche und kulturelle Fortschritte letztlich ein integraler Bestandteil des biosphärischen Evolutionsgeschehens.

Literaturverzeichnis

- [1] W. Weaver, "Science and complexity," *American Scientist*, vol 36, pp. 536-544, 1948.
- [2] D. Scheithauer, Parameterschätzung mit einem modifizierten Maximum-Likelihood-Verfahren bei Systemen mit Prozess- und Messrauschen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988.
- [3] H. Wußing, 6000 Jahre Mathematik: Eine kulturgeschichtliche Zeitreise – Bd. 2, Von Euler bis zur Gegenwart. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [4] M. Tomasello, *A Natural History of Human Thinking*. Cambridge MA, London: Harvard University Press, 2014.
- [5] N. Kompa, Hrsgin., *Handbuch Sprachphilosophie*. Stuttgart: Springer-Verlag, 2015.
- [6] D. Hume, *A Treatise of Human Nature: Being an Attempt to introduce the experimental Method of Reasoning into Moral Subjects*. London, 1739.
- [7] A. Koschorke, *Wahrheit und Erfindung: Grundzüge einer allgemeinen Erzähltheorie*. Frankfurt a. M.: S. Fischer, 2012.
- [8] J. W. Dawson, *Logical Dilemmas: The Life and Work of Kurt Gödel*. Boca Raton FL: CRC Press, 1997.
- [9] N. Wiener, *Cybernetics: or, Control and Communication in the Animal and the Machine*, 2nd ed. Cambridge MA: The M.I.T. Press, 1961 (1948).
- [10] L. v. Bertalanffy, *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. New York NY: George Braziller, 1969.
- [11] R. W. Weisberg, *Creativity: Understanding Innovation in Problem Solving, Science, Invention, and the Arts*. Hoboken NJ: John Wiley & Sons, 2006.
- [12] E. B. Goldstein, *Sensation and Perception*, 8th ed. Belmont CA: Wadsworth, 2010,
- [13] H. Reichenbach, *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*. Berlin, Leipzig: Walter de Gruyter, 1928.
- [14] K. R. Popper, *Logik der Forschung: Zur Erkenntnistheorie der modernen Naturwissenschaft*, 11. Auflage. Tübingen: Mohr Siebeck, 2005 (1935).