

Klaus Lucas

Einleitung

Angeregt durch eine interdisziplinäre Diskussion über Kausalität in der Versammlung der Mitglieder der BBAW hat die Technikwissenschaftliche Klasse dieses Thema in ihren Sitzungen des Jahres 2006 vertieft und nach den in ihr vertretenen Disziplinen ausdifferenziert. Dabei war die fundamentale Bedeutung kausaler Zusammenhänge für die Entwicklung technischer Strukturen ebenso unstrittig wie die Erkenntnis, dass Grenzen des Wissens wie auch prinzipielle Unwägbarkeiten stets zu Einschränkungen in der Sicherheit und zu Raum für Zufälligkeiten führen, die insgesamt in eine notwendige Akzeptanz von Risiko münden. Allerdings sind die Anteile strenger Kausalität und damit verbundener Vorhersagbarkeit in den verschiedenen Disziplinen sehr unterschiedlich.

Unter Kausalität versteht man allgemein das Vorliegen eines gesetzmäßigen Wirkungszusammenhangs zwischen Phänomenen in der Weise, dass ein als Ursache bezeichnetes Ereignis A unter bestimmten Bedingungen ein bestimmtes anderes als Wirkung bezeichnetes Ereignis B notwendig hervorbringt. Dabei geht die Ursache A der Wirkung B zeitlich voraus und B tritt unter den selben Bedingungen niemals ein, ohne dass vorher A eingetreten ist. Die strenge Ursache-Wirkungs-Beziehung ist das Entscheidende der Kausalität. Sie hat tiefere Wurzeln als die einfache Korrelation, wie zum Beispiel Klimaveränderung und fossile Verbrennungsprozesse, da fossile Verbrennungsprozesse nicht streng, sondern allenfalls unterstützend die Ursache für die Klimaveränderung sind. Sie ist auch mehr als eine regelmäßige zeitliche Abfolge, wie etwa Tag und Nacht, da der Tag sicher nicht die Ursache für die Nacht ist. Der Begriff der Kausalität geht schließlich auch über den der reinen Gesetzmäßigkeit hinaus, da beispielsweise der gesetzmäßige Zusammenhang zwischen der Fläche eines Kreises und seinem Durchmesser nicht einer Ursache-Wirkungs-Beziehung entspringt. Kausalität als Beziehung zwischen Wirkungen aus vorgegebenen Ursachen ist die einzige wissenschaftlich fundierte Grundlage für die sichere Vorhersage von Ereignissen.

In den Technikwissenschaften werden Artefakte geschaffen, die als Wirkungen, das heißt als Ergebnis ursächlichen Handelns anzusehen sind. Sie haben eine vorgegebene Funktionalität. Das Kausalitätsprinzip ist daher für ihre Gestaltung und Zuverlässigkeit von fundamentaler Bedeutung. Dem Kausalitätsprinzip in den Technikwissenschaften wird

offenbar großes Vertrauen entgegengebracht. Man steigt bedenkenlos in Flugzeuge, fährt über Brücken, hält sich in Hallen auf und betreibt Prozesse mit erheblichem Gefährdungspotential. In aller Regel funktioniert die Technik und stützt das Vertrauen in die Kausalität ihrer Entwicklung. Gelegentlich aber kommt es zu Unfällen, Katastrophen, unvorhergesehenen Wirkungen in der Natur. Dann macht sich Verunsicherung breit. Es wird Ursachenforschung betrieben, Versagenstheorien werden entwickelt und Schuldige gesucht. Auch diese Reaktion ist letztlich von Vertrauen in die Kausalität gekennzeichnet. Ist dieses Vertrauen berechtigt? Welche Rolle spielt der Zufall? Wie kann man das mit der Nutzung technischer Produkte verbundene Restrisiko abschätzen und minimieren? Diesen Fragen wird in der vorliegenden Schrift an Hand von Beispielen aus unterschiedlichen Technik-Fachgebieten nachgegangen.

Die Arbeitsprinzipien und der Gestaltungsrahmen der Technikwissenschaften sind die Naturgesetze, die Ursache-Wirkungs-Beziehungen formalisieren. Grundsätzliche Erkenntnisse über Kausalität in den Technikwissenschaften sind daher zunächst aus der Analyse der einschlägigen Naturgesetze zu gewinnen. Der Prototyp eines solchen Naturgesetzes ist die Newtonsche Bewegungsgleichung, eine Differentialgleichung zweiter Ordnung zur Berechnung des Ortes eines Körpers in Abhängigkeit von der Zeit. Wenn Ort und Bewegungszustand (Impuls oder Geschwindigkeit) eines Körpers zu einem Zeitpunkt t_0 gegeben, und die Bedingungen seiner weiteren Bewegung in Form eines Kraftgesetzes, beispielsweise der Schwerkraft, definiert sind, dann sind Ort und Bewegungszustand zu allen späteren Zeiten determiniert. Soll also ein bestimmter Ort und Bewegungszustand eines Körpers zu einem bestimmten Zeitpunkt erreicht werden, zum Beispiel eines Satelliten im Weltraum, so lässt sich dieser als Ergebnis (Wirkung) eines Orts- und Bewegungszustands zu einem früheren Zeitpunkt (Ursache), nämlich dem Abschuss vom Erdboden, und dem einschlägigen Kraftgesetz, herbeiführen. Da alles Geschehen letztlich Bewegung ist, das heißt aus dem Newtonschen Gesetz ableitbar sein sollte, liegt der Schluss nahe, dass die Zukunft aller Phänomene prinzipiell aus der Vergangenheit berechenbar ist. Und ebenfalls ergibt sich, dass erwünschte Wirkungen aus ursprünglichen Zuständen durch gezieltes Handeln erreichbar, und zumindest im Prinzip vorhersagbar sein sollten. Im Newtonschen Weltbild ist daher, bei oberflächlicher Betrachtung, kein Raum für Unsicherheit, Zufall oder Risiko. Diese grundlegende Erkenntnis zur naturwissenschaftlichen Basis der Kausalität ist auch durch die beiden fundamentalen Erweiterungen der klassischen Mechanik auf kleine und große Dimensionen, also die Quantenmechanik (zumindest bei Beschränkung auf Erwartungswerte) und die Relativitätstheorie, nicht umgestoßen worden.

Tatsächlich ist jedoch diese strenge Art von Vorhersagbarkeit im Allgemeinen nicht zu beobachten. Die Ursachen dafür sind vielfältig, teilweise grundsätzlicher, teilweise praktischer Natur. Schon die einfache Newtonsche Bewegungsgleichung, die an sich eine strenge Ursache-Wirkungs-Beziehung beschreibt, lässt grundsätzliche Grenzen der Vorhersagbarkeit erkennen, wenn man sie auf reale Situationen anwendet. Sowohl die Ursachen, hier der anfängliche Orts- und Bewegungszustand, wie auch die Bedingungen seiner Veränderung, hier das Kraftgesetz, sind in realen Fällen nur ungenau bekannt bzw. beschreibbar. Damit kann die Bewegungsgleichung, trotz des streng kausalen Zusammenhangs zwischen Ursache und Wirkung bei definierten Bedingungen, den Anspruch einer präzisen Vorhersage der Zukunft aus der Vergangenheit nicht einlösen. Es können immer nur Ergebnisse mit Unsicherheiten angegeben werden. Dabei hängt das Ausmaß der Unsicherheit vom betrachteten Fall, zum Beispiel vom einzusetzenden Kraftgesetz ab. In vielen Anwendungen der Bewegungsgleichung sind die Unsicherheiten so gering, dass sie für praktische Fragestellungen irrelevant sind, etwa bei der Bahnberechnung von Planeten. In anderen wiederum führen bereits kleine Unsicherheiten in den Anfangsbedingungen zu so großen Streuungen der Wirkungen, dass den Ergebnissen keine praktische Bedeutung zukommt, zum Beispiel bei der langfristigen Wetterprognose.

In der Tat findet man ganz allgemein und ohne Einschränkung auf das Newtonsche Bewegungsgesetz in den Technikwissenschaften, dass auf der einen Seite eine Vielzahl physikalisch-chemischer Phänomene durchaus befriedigend vorausgesagt werden können, während in vielen anderen Fällen jeder Versuch einer Vorhersage scheitert. Dieses unterschiedliche Verhalten hängt grundsätzlich mit Systemeigenschaften, die man als lineare oder nicht-lineare Ursache-Wirkungs-Beziehungen bezeichnet, zusammen. Von Linearität spricht man, wenn zwischen Ursache und Wirkung ein proportionaler Zusammenhang besteht, wie beispielsweise bei kleinen Auslenkungen einer Feder. Viele technische Systeme und Prozesse sind in Bezug auf das Wesentliche, was sie leisten sollen, linear und darum in ihrem Verhalten auch vorhersagbar, zumindest in den Grenzen, die durch die Unsicherheiten ihrer äußeren und inneren Eigenschaften gezogen sind. Die Unschärfe der Vorhersagen ist aus diesen Unsicherheiten ableitbar und ist begrenzt. Es herrscht Kausalität. Ganz anders ist die Situation bei nichtlinearen Ursache-Wirkungs-Beziehungen. Auch hierfür kann eine Anwendung des Newtonschen Bewegungsgesetzes als Beispiel dienen. Wenn etwa die Kraft auf einen Körper nicht die einer oder mehrerer mechanischen Federn ist, sondern die eines oder mehrerer Magneten, wird das System nichtlinear. Man findet dann, zum Beispiel bei einem durch mehrere Magneten angezogenen Pendel, dass nun die Bewegung im Laufe der Zeit völlig unterschiedlich wird,

wenn nur minimale, das heißt unvermeidbare Variationen in den Anfangswerten zugelassen werden. Mit jedem Zeitschritt vergrößert sich die Unsicherheit, exponentiell, und die Vorhersagefähigkeit reduziert sich auf kleine Zeiten. Eine vollkommen deterministische Gleichung, wie hier das Newtonsche Bewegungsgesetz, liefert dann sogar unvorhersehbar Neues, nicht nur ein durch unscharfe Anfangsbedingungen begründetes unscharfes Ergebnis. Die Kausalität ist praktisch aufgehoben. Unsicherheit in den Prozessbedingungen und -parametern in Verbindung mit nicht-linearen Ursache-Wirkungs-Beziehungen sind verantwortlich für den Zusammenbruch der Kausalität, auch und insbesondere in den Technikwissenschaften.

Nichtlinearität der innewohnenden Gesetze ist stets der Grund für Grenzen der Kausalität, und dann für Unvorhersagbarkeit, Unsicherheit, Risiko und Einfluss des Zufalls. Sie führt unter anderem zu der beobachteten Vielfalt sprunghafter Veränderungen in Systemen. So weiß man, dass Systeme bei hinreichend großen Triebkräften, wie Fluidströmungen oder chemische Reaktoren, aber auch biologische Organe wie das menschliche Herz, auf Grund der dann wirksamen Nichtlinearität generell dazu neigen, spontane Verhaltensänderungen durchzumachen und sich zu neuen und unerwarteten Formen organisieren können. Allbekannte Beispiele sind die Bénard-Konvektion der Hydrodynamik und die chemische Uhr der Belusow-Zhabotinsky-Reaktion oder auch der normale Herzschlag als Beispiel für hochgeordnete Zustände. Es gibt aber auch den Umschlag ins Chaos, wie es bei der Strömungsturbulenz oder Herzflimmern der Fall sein kann. Viele in den Technikwissenschaften bedeutsame Systeme zeigen bei starken Triebkräften solche sprunghaften Veränderungen zu neuen Ordnungszuständen oder auch zu Chaos. Ihnen allen ist gemeinsam, dass man zwar die Bedingungen für solche Sprünge beschreiben kann, gelegentlich sogar quantitativ, dass die Details der neuen Zustände jedoch grundsätzlich nicht vorhersagbar sind. Es ist so, als habe Materie unter besonderen Umständen einen eigenen Willen. Tatsächlich werden unter nichtlinearen Bedingungen kleine zufällige Fluktuationen verstärkt und kollektiv zu einem oder mehreren neuen unvorhersehbaren Zuständen getrieben, während im linearen Bereich dieselben Fluktuationen gedämpft werden und damit das Verhalten des Systems nicht beeinflussen.

Bei nichtlinearen Systemen und großen Triebkräften gilt insbesondere, dass eine Beschreibung mit sinnvoller Genauigkeit nicht mehr auf der Grundlage eines reduktionistischen Ansatzes möglich ist. Ein solcher Ansatz, der in den Technikwissenschaften weit verbreitet ist, teilt eine Struktur in kleine, einfache Teile auf und schließt von dem Verhalten der Teile auf das der Struktur. Dieser Ansatz hat großartige Erfolge in vielen Fällen der Technikwissenschaften hervorgebracht. Ein bemerkenswertes Beispiel ist die Beschrei-

bung der Strukturen in Fluiden im Gleichgewicht auf der Grundlage der Eigenschaften und Wechselwirkungen der Moleküle. Durch die Anwendung statistischer Methoden können die makroskopischen Eigenschaften eines Fluids aus unvorstellbar vielen Molekülen mit hoher Präzision aus geeigneten Kraftgesetzen zwischen den einzelnen Molekülen abgeleitet werden. Dieser Triumph des Reduktionismus auf atomistischer Ebene gilt jedoch nur unter einschränkenden Bedingungen. So können zum Beispiel die Atome Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff in einem Fluid bei entsprechend hohen Triebkräften, das heißt Wechselwirkungsenergien, auf vielfache Weise zu neuen Komponenten reagieren, deren Eigenschaften keineswegs aus denen der Atome, also auf reduktionistische Weise ableitbar sind. Auch wenn Temperatur- und Geschwindigkeitsgradienten hinreichender Größe aufgeprägt werden, nimmt das Fluid Strukturen an, die sich der Vorhersagbarkeit aus den Eigenschaften der Moleküle entziehen. Der reduktionistische Ansatz verliert seine Gültigkeit, das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile. Das dem reduktionistischen Ansatz innewohnende Postulat der Kausalität zwischen Ursachen, nämlich den Eigenschaften der Teile, und Wirkungen, also den Eigenschaften des Gesamtsystems, ist verletzt. Es muss durch einen holistischen Ansatz ersetzt oder zumindest ergänzt werden.

Analoge Erkenntnisse gelten für alle typischen Gestaltungsprozesse in den Technikwissenschaften. Sie sind durch eine Vielfalt von überlagerten kausalen und nicht-kausalen Abhängigkeiten gekennzeichnet, angesichts derer die hohe Zuverlässigkeit der hervorgebrachten Funktionalitäten zunächst erstaunlich ist. Dies hat mehrere Ursachen, die in der Arbeitsweise bei der Gestaltung technischer Produkte und Prozesse sowie ihrer Nutzung begründet sind. Vielfach treten als Funktionalität eines technischen Produkts keine detaillierten, prinzipiell unvorhersagbaren Parameter in Erscheinung, sondern nur grobe, aus Mittelwertbildungen entstandene. Obwohl man bei der langfristigen Wetterprognose nicht sagen kann, ob am 15. August um 12.00 Uhr die Sonne scheint, wenn sie im Jahr zuvor am 15. Dezember um 12.00 Uhr geschienen hat, so kann man doch mit großer Wahrscheinlichkeit sagen, dass die Mittagstemperatur am 15. August höher ist als am 15. Dezember. Ein grober Parameter kann vorhergesagt werden, ein feiner nicht. Das gilt allgemein: die nach außen wirksame Funktionalität eines Verbrennungsmotors ist der Antrieb des Automobils. Sie kann aus maschinentechnischen Daten und Kraftstoffeinsatz mit hoher Genauigkeit vorhergesagt werden, nicht aber die Details der Verbrennungsprozesse im Motor wie die Schadstoffbildung. In dem Maße, wie sich die relevante Funktionalität durch grobe Mittelwerte beschreiben lässt, die ihrerseits zumindest prinzipiell durch lineare Beziehungen auf Ursachen zurückgeführt werden können, gilt strenge Kausalität. Praktisch wird ein reduktionistischer Ansatz gewählt. Der reale Prozess wird durch ein

Modell ersetzt. Dabei hat die Modellbildung die Aufgabe, die nicht beherrschbare Komplexität des realen technischen Problems in einer Weise zu reduzieren, dass zwar wesentliche Aspekte des Problems erhalten bleiben, das Modell jedoch, im Gegensatz zur Realität, mit verfügbaren Methoden analysiert werden kann. Dem Modell liegt eine strenge Kausalität zu Grunde, das heißt Eingangparameter werden durch das Modell streng deterministisch in Ausgangparameter transformiert. Neben den eindeutigen Vorhersagen, die ein solches Modell bei eindeutigen Eingangsparemtern macht, lassen sich damit auch die Auswirkungen unsicherer Parameter einer Problemstellung analysieren. So ist generell bei technischen Gestaltungsprozessen davon auszugehen, dass viele die spätere Funktionalität beeinflussende Parameter praktisch oder auch prinzipiell nicht genau bekannt sind. Ein Beispiel für praktisch nur ungenau bekannte Parameter im konstruktiven Ingenieurbau sind Werkstoffeigenschaften oder geometrische Imperfektionen von Teilen eines Bauwerkes, etwa einer Brücke. Ein Beispiel für prinzipiell nicht genau bekannte Parameter sind äußere Lasten wie Wind, Schnee oder Erdbeben. Das kausale Modell kann stochastische Annahmen über die Unsicherheiten zu Wahrscheinlichkeitsaussagen über seine Funktionalität verarbeiten. Auch kausale Sensitivitätsstudien über den Einfluss ungenauer Parameter können am Modell durchgeführt werden. Es hat sich gezeigt, dass eine zunehmende Verfeinerung der Modellbildung unter Berücksichtigung von Unsicherheiten das Risiko der Disfunktionalität des technischen Produkts erheblich reduziert.

Allerdings hat der Modellreduktionismus Grenzen: eine beliebig weitgehende Detaillierung der Modellbildung ist nicht nur praktisch unmöglich. Im Bestreben zunehmender Annäherung an die Realität führt sie außerdem ihrerseits zunehmend weitere ungenau bekannte Parameter oder sogar Nichtlinearitäten ein. Damit ist die Modellbildung *ad absurdum* geführt. Das verbleibende Instrument zur verlässlichen Abbildung der Realität und Vorhersage ist dann die Einführung empirischer Korrekturen. Dies ist grundsätzlich ein holistischer Ansatz, denn nun wird das reale Verhalten des Gesamtsystems zur Entwicklung von Korrekturtermen des Modells eingebracht. Ein optimales Modell ist dadurch gekennzeichnet, dass es selbst analytisch oder numerisch leicht handhabbar ist und dass die notwendigen empirischen Korrekturen klein und universell für eine große Klasse von Phänomenen sind. Dann ist die Vorhersagekraft des korrigierten Modells groß und erklärt die hohe Zuverlässigkeit der auf diese Weise gestalteten technischen Strukturen. Man kann in diesem Sinne von begrenzter Kausalität in den Technikwissenschaften sprechen.