

## *Kausalität in den Technikwissenschaften*

Meine sehr verehrten Damen und Herren, liebe Kolleginnen und Kollegen, ich bin von der technikwissenschaftlichen Klasse beauftragt worden, hier einige Überlegungen zur Frage der Kausalität vorzutragen und damit hoffentlich dem impressionenreichen Bild der bisherigen Beiträge zum Thema Kausalität einen weiteren Tupfer oder einen weiteren Mosaikstein hinzuzufügen. Dabei wird sich einiges wiederholen, was bereits im letzten Jahr an dieser Stelle diskutiert worden ist. Auf der Basis der verschiedenen (bereits hier früher andiskutierten) Konzepte von Kausalität will ich sukzessiv einen pragmatischen Vorschlag für ein Verständnis von Kausalität entwickeln, das sich vor allem für eine Anwendung in den Technikwissenschaften eignet. Dazu werde ich einige wenige Anwendungsbeispiele aus Beiträgen von Mitgliedern der technikwissenschaftlichen Klasse bringen, die hier aber aus Zeitgründen nur kursorisch aufgeführt werden können.

Zunächst zum Begriff der Kausalität: Unser Sekretar, Herr Lucas, hat in seinem grundlegendem Papier zu Beginn unserer Diskussion in der technikwissenschaftlichen Klasse Kausalität folgendermaßen definiert: „Unter Kausalität versteht man 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“. Von dieser klassischen Definition können wir ausgehen.

Grundsätzlich beschreibt Kausalität einen Zusammenhang zwischen zwei und mehr Phänomenen, wobei dieser Zusammenhang entweder auf eine intentionale Beziehung (Ich bin durstig: deshalb trinke ich ein Glas Wasser) oder auf eine Ursache-Wirkungs-Kette (Der Schlangebiß führt unweigerlich zum Tode) hinweist. Dabei können Ursachen wie Wirkungen von Menschen unabhängige Ereignisse oder durch Menschen ausgelöste Aktivitäten sein. Im Folgenden möchte ich mich ganz auf die Frage der Ursache-Wirkungsketten beziehen.

In diesem Zusammenhang tauchen Aspekte der Unsicherheit unsers Wissens, der Mehrdeutigkeit der Resultate von Messungen und Experimenten, der dadurch entstehen-

den Undeutlichkeit in den Beziehungsmustern zwischen den Variablen, der nichtlinearen und chaotischen Übergänge in ansonsten eindeutig funktionalen Zusammenhängen und der komplexen, nicht mehr auflösbaren Vielschichtigkeit von interagierenden Ursache-Wirkungsketten auf, die alle in den Natur- und Technikwissenschaften aber auch in den Sozialwissenschaften eine zunehmend bedeutende Rolle spielen. Wie sollen wir damit umgehen?

Folgende drei Probleme sind grundlegend für das Verständnis von Kausalität:

- Sind kausale Strukturen in der Natur der Phänomene selbst angelegt oder sind sie kulturelle Zuschreibungen? Auf diese Frage sind in der letztjährigen Sitzung Herr Mittelstraß, Herr Gethmann und auch Herr Kliegl ausführlich eingegangen.
- Können kausale Strukturen wirklich gemessen werden oder sind es nicht verifizierbare Axiome unseres Denkens?
- Können wir Kausalität auch probabilistisch denken oder ist Kausalität notwendigerweise mit Determinismus verbunden?

Wenn man sich diese drei Fragen vornimmt, können wir drei Konzepte von Kausalität differenzieren. Ich gehe die ersten beiden sehr schnell durch, denn sie sind ja hier schon vorgestellt worden.

### *Das ontologisches Konzept der Kausalität*

Nach diesem Konzept ist die Natur selbst kausal angelegt. Ob Menschen dies erkennen oder nicht, spielt dabei keine Rolle. Dieses Konzept beruht auf einer Reihe von Annahmen:

- Alle Phänomene haben eine Ursache oder mehrere Ursachen.
- Kausale Strukturen sind determiniert.
- Beobachtungen von Regelmäßigkeiten geben Hinweise auf Kausalität.
- Kausale Beziehungen können durch Experimente zumindest vorläufig verifiziert werden: Als Ausgangspunkt gilt das Hempel-Oppenheim Schema der deduktiven Ableitung, wobei neben einem allgemeinen Gesetz (a führt zu b) eine empirische Randbedingung (a liegt vor) erfüllt sein muß.
- Das Konzept differenziert zwischen notwendigen und hinreichenden Bedingungen: Für das Auftreten eines Phänomens A können mehrere Ursachen in Frage kommen. Dabei gilt es herauszufinden, welche Bedingungen  $B_1$ -  $B_n$  für A notwendig sind und welche Bedingungen  $B_1$ -  $B_m$  zusätzlich erfüllt sein müssen, damit A immer als Folge von B auftreten wird.

Diese Annahmen sind alle umstritten. Ob alle Phänomene eine Ursache haben oder nicht, läßt sich nicht zweifelsfrei beweisen. Dies könnte man als ein Axiom aus der unmittelbaren Lebenserfahrung ableiten, aber die Frage, ob die Welt kausal aufgebaut ist, bleibt eine Anschauungssache. Auch unter methodologischen Aspekten ist es klar, daß selbst das ideale Experiment Kausalität nicht nachweisen kann, denn jeder Versuch in Zeit und Ort bleibt einzigartig, selbst wenn man versucht, alle Bedingungen zu kontrollieren und die geltenden Kontextvariablen zwischen experimentellem Design und Kontrolldesign konstant zu halten. Ebenso führt die Annahme von notwendigen und hinreichenden Bedingungen zu einer Einteilung nach Wissensbeständen, die in dieser Form mit der objektiven Realität nicht übereinstimmen muß. Vor allem ist die Frage, wie man aufgrund von Datenanalyse auf der Basis zeitlicher Folgen, statistischer Korrelationen oder experimenteller Versuchsanordnungen (mit Stimulus und ohne Stimulus) auf kausale Beziehungen rückschließen kann, ohne Deutungszuschreibungen kaum zu beantworten. Insofern ist auch die Kritik von Einstein an diesem Konzept nachvollziehbar. Er schreibt: „Die einer Theorie zugrunde liegenden Begriffe und Grundgesetze [...] sind freie Erfindungen des menschlichen Geistes, die sich weder durch die Natur des menschlichen Geistes noch sonst in irgendeiner Weise a priori rechtfertigen lassen. [...] Insofern sich die Sätze der Mathematik auf die Wirklichkeit beziehen, sind sie nicht sicher, und insofern sie sicher sind, beziehen sie sich nicht auf die Wirklichkeit.“ (Dieses Zitat habe ich dem Beitrag von Herrn Bergmeister entnommen).

### *Das konstruktivistische Konzept der Kausalität*

In diesem Konzept ist Kausalität ein mentales Hilfsmittel der Vernunft: Es ist die Bedingung für Erfahrung, aber nicht ihre Voraussetzung. Die menschliche Vernunft hat das Prinzip der Kausalität eingeführt, um die Phänomene der Welt in eine Ordnung zu bringen. Ob diese Ordnung der inneren Struktur der Phänomene entspricht, ist dabei nicht objektiv zu klären. Auch dieses Konzept beruht auf einer Reihe von Annahmen:

- Kausalität ist eine mentale Leistungen der Vernunft zur Ordnung von Phänomenen im Zeitablauf.
- Kausale Strukturen sind Modelle, die Komplexität reduzieren, und auf kulturellen und sozialen Selektionsformen beruhen.

- Beobachtungen sind subjektiv, aber es gibt Möglichkeit intersubjektiver Übereinstimmung, die aber nicht den Grad der Objektivität messen, sondern den Grad der Plausibilität.
- Eine empirische Verifikation von kausalen Beziehungsmustern ist innerhalb eines spezifischen intersubjektiven Kontextes (Vereinbarungen innerhalb der jeweiligen Community) möglich, aber es gibt keine universelle Gültigkeit außerhalb dieser Community.

Diese Annahmen sind ebenso umstritten wie die Annahmen bei dem ontologischen Konzept. Im Vordergrund steht die Kritik an dem Relativismus: Wenn alle analytischen Sätze nur mentale Zuschreibungen sind, dann gibt es letztlich auch keine sinnvolle Qualitätskontrolle für Wahrheit. Dies führt zur Beliebigkeit. Auch kommt es hier zum Problem des infiniten Rückgriffs auf das Subjektive. Es gibt keine Anschlußfähigkeit mehr zwischen den Wahrheitsansprüchen der unterschiedlichen Communities: die Realität wird von inkompatiblen Realitätsbildern überschattet. Innerhalb des konstruktivistischen Lagers gibt es eine Reihe von Schattierungen. Die moderate Schule des Konstruktivismus geht davon aus, daß es zumindest eine isomorphe Beziehung zwischen kausalem Wissen und Phänomenen gibt; die radikal konstruktivistische Schule sieht jedoch in jedem analytischen Ansatz eine mentale Konstruktion, die unabhängig von der realen Welt existiert. Dazu ein Zitat des Soziologen Niklas Luhmann (1989): „Als Medium ist Kausalität die bloße Möglichkeit einer Zurechnung von Wirkungen auf Ursachen. Als Form ist Kausalität vollzogene Zurechnung, die von Situationen, aber auch von Auswahlgepflogenheiten des Beobachters abhängt“.

### *Deterministische versus probabilistische Vorstellungen von Kausalität*

Quer zu dem ontologischen und dem konstruktivistischen Konzept liegt eine weitere Dimension: die Frage von Determinismus versus Probabilismus. Ich führe diese weitere Dimension schon hier ein, bevor ich auf das dritte Konzept zu sprechen komme, weil es zum Verständnis desselben notwendig ist.

Beim deterministischen Konzept wird angenommen, daß jedes beobachtbare Phänomen durch eine und nur eine Kombination von Ursachen „erklärt“ werden kann. Im Umkehrschluß heißt das auch: Jede Ursache oder Ursachenkombination führt zu einer bestimmten Folge. Bei dem probabilistischen Konzept werden eine Ursache oder eine Ursachenkombination nicht mehr einer bestimmten Folge gänzlich zugeordnet, sondern nur im Ausmaß oder im Grad der Auswirkungen dieser Folge. Mathematisch gesehen verändert das Auftreten der Ursache die Wahrscheinlichkeit des Auftretens des zu erklä-

renden Phänomens, ohne dieses zu determinieren. Man spricht hier auch von Kausalbeziehungen unter Unsicherheit. Es gibt eine Reihe von wissenschaftlichen Ansätzen, um Folgen von Handlungen oder Ereignissen unter der Bedingung der Unsicherheit vorherbestimmen zu können. Dazu müssen einerseits Ursache-Wirkungs-Beziehungen in ihrer Grundrichtung bekannt und andererseits mögliche Verteilungsmuster über Zeit oder über Individuen statistisch abschätzbar sein. Kausalität unter Unsicherheiten ist die systematische Kombination von Wissen und Zufall. Mit Hilfe der induktiven Statistik können Streuungen von Folgen zuverlässiger als auf der Basis reiner Intuition prognostiziert werden. Bei allem Fortschritt in der Modellierung von Konsequenzen und Wahrscheinlichkeiten verbleiben aber viele Unsicherheiten, die mit mangelndem Wissen, undeutlichen Systembegrenzungen, Extrapolationsfehlern u.a.m. verbunden sind. Zudem können wissenschaftlich errechnete Kausalbeziehungen nur Durchschnittswerte über (theoretisch unendlich) lange Zeiträume widerspiegeln. Ebenso können durch Nichtlinearitäten vor allem bei Phasenübergängen chaotische Wirkmuster auftreten, die einer Prognose nicht oder nur teilweise zugänglich sind.

Was ist die Ursache für Probabilistik? Hier gibt es drei Erklärungsmöglichkeiten:

- *Unzureichendes Wissen (Determinismus bleibt als Grundschema erhalten)*: Unser Wissen ist unzureichend. Je mehr Wissen wir ansammeln, desto näher kommen wir den deterministischen Gesetzmäßigkeiten, selbst wenn wir komplexe Phänomene untersuchen. Diese Interpretation ist kompatibel mit dem ontologischen Konzept.
- *Unerreichbares Wissen (Modell des Determinismus bleibt als Ideal bestehen, kann aber nach menschlichem Ermessen auch bei zusätzlichem Wissen nie erreicht werden)*: Diese zweite Möglichkeit der Interpretation besteht darin, daß streng kausales Wissen für den Menschen prinzipiell unerreichbar ist. Dabei bleibt der Determinismus als Ideal bestehen, aber unsere Epistemologie erlaubt es nicht, die vielen interagierenden Kausalfaktoren zu übersehen und eindeutig in Ursachen-Wirkungsketten zu ordnen. Unser Wissen ist dieser Komplexität nicht gewachsen. Selbst wenn wir noch so viel forschen würden, würden immer Unschärfen verbleiben. Das Wissen ist also prinzipiell beschränkt, das Phänomen kann dagegen sehr wohl streng kausal geordnet sein.
- *Genuin stochastische Prozesse (ein Determinismus liegt auch in der Struktur der Phänomene nicht vor)*: Diese dritte, weitergehende Möglichkeit besteht darin, daß auch in der Natur probabilistische Gesetzmäßigkeiten herrschen. Danach bestehen neben deterministischen Beziehungen auch genuin stochastische Prozesse, die von Natur aus statistische Verteilungen aufweisen und somit eine strenge deterministisch-kausale Beziehung nicht aufweisen.

In den technischen Wissenschaften spielen probabilistische Konzepte eine immer bedeutsamere Rolle. Sie werden sowohl im Rahmen der Erkennung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen (etwa durch die Anwendung der induktiven Statistik) wie auch im Rahmen der konstruktiven Auslegung von Technik (etwa bei Gebäuden, Kernkraftwerken, Chemieanlagen) angewandt. In unserer Diskussion in der Klasse wurden dazu drei exemplarische Vorgehensweisen genannt:

- die induktive Statistik, also die Berechnung von Konfidenzintervallen; hier kann man den Haupteffekt modellieren, also die undeutlichen Beziehungen auf diejenigen Effekte reduzieren, die man als erklärungs-würdig ansieht, und das Hintergrundrauschen in Kauf nehmen;
- die Setzung von System- oder Betrachtungsgrenzen, um eine systematische Reduktion der komplexen Beziehungsmuster zu erreichen; d. h. man kann dadurch komplexe Interaktionen auf ein überschaubares Maß reduzieren;
- Szenarienbildung und weitere Charakterisierung von Nichtwissen; hier werden bestimmte Wirkungsketten über Zeit nach einem bewußten Auswahl-schema (Wünschbarkeit, Worst Case, Best Case, Backcasting) ausgewählt und deren Wechselwirkung simuliert, etwa durch den Einsatz von Monte-Carlo Simulationsverfahren.

Damit komme ich zum dritten Konzept, und ich leite das mit einem Zitat eines Nicht-technikers ein, und zwar mit C. G. Jung: „Wirksam ist, was wirkt.“ Dieses dritte Konzept bedeutet, daß Kausalität den Grad der Wirksamkeit menschlicher Interventionen in Natur und Gesellschaft beschreibt.

### *Ein funktionales Konzept der Kausalität*

Aus der Diskussion der verschiedenen Ansätze dürfte deutlich geworden sein, daß kein Ansatz erkenntnistheoretisch voll überzeugen kann und man am besten auf eine pragmatische Form der Kausalität zurückgreifen sollte. Für die technischen Wissenschaften könnte dies der funktionale Ansatz sein, wie er ansatzweise von einer Reihe von Philosophen (etwa Janisch) vertreten wird. Dieser funktionale Ansatz beruht auf folgender Vorgehensweise:

- Es gibt eine kulturelle Festlegung von Zielen oder Bedürfnissen, die nicht durch die Phänomene selbst, sondern durch Wünsche und Präferenzen von Menschen vorgegeben sind. Diese Wünsche sind mentale Konstrukte (etwa der Wunsch, schnell und bequem lange Strecken zurücklegen zu können).

- Im Rahmen der technischen Wissenschaften werden Interventionen in die Realität vorgenommen mit dem Ziel, die Wünsche und Präferenzen wunschgerecht (effektiv) und mittelsparend (effizient) erreichen zu können (etwa die Konstruktion von Fahrrädern, eines Perpetuum mobile oder eines Wachsflügels).
- Diese Interventionen werden im empirische Versuch oder durch theoretische Simulation getestet d. h. der Zeilerfüllungsgrad wird gemessen. Wird das Ziel überhaupt nicht erreicht (Beispiel Perpetuum mobile) wird Kausalität nicht angenommen, wird das Ziel vollständig erreicht, wird eine deterministische Kausalität unterstellt, wird es teilweise oder zu einem gewissen Grad erreicht, eine probabilistische Kausalität.

Dieses Konzept beruht auf einer Reihe von Annahmen:

- Kausalität ist der Gradmesser der Erfolgskontrolle von Interventionen durch menschliche Handlungen.
- Kausale Strukturen sind Modelle, die intersubjektive Erfahrungen über die Beziehungen zwischen Interventionen und deren Wirkungen zusammenfassen.
- Ziele sind subjektiv, aber die Möglichkeit der Erfolgskontrolle ist intersubjektiv überprüfbar.
- Eine empirische Verifikation im Rahmen der Zielvorstellung ist möglich und kann auch unter den gegebenen Kontextbedingungen (universelle) Gültigkeit beanspruchen.

Das funktionale Konzept vermeidet sowohl den naiven Naturalismus des ontologischen Konzeptes wie auch den ausufernden Relativismus des konstruktivistischen Konzeptes. Es handelt sich dabei um ein mediatives Konzept. Technik ist die Verbindung zwischen einem intentionalen mentalen Konstrukt (etwa fliegen zu wollen) und der Umsetzung dieses Konstruktes mit Hilfe von Beobachtung und Experiment (real oder simuliert) an der Realität (Wachsflügel sind problematisch und extrem riskant, breite Tragflächen mit geringem Gewicht und großer Oberfläche sind dagegen funktional für den Zweck eines risikoarmen Fluges). Kausalität ist also nur in Verbindung mit einer Zwecksetzung und einer Intervention definiert.

Natürlich hat auch dieses Konzept auch eine Reihe von Problemen:

- Die Anschlußfähigkeit an andere Kausalitätsprinzipien ist begrenzt.
- Die Frage der Universalisierbarkeit von Erfolgskriterien ist zum Teil kulturabhängig.
- Der Grad der Wirksamkeit von Interventionen hängt von kulturellen Definitionen von „Erfolg“ ab (Selbsttäuschung, selbst-erfüllende Prophezeiung, etc.).
- Das Problem der Unterscheidbarkeit zwischen Korrelation und Kausalität bleibt erhalten, wird aber abgeschwächt.

Der Vorteil des funktionalen Konzeptes ist seine besondere Eignung für das Verständnis von technischen Wissenschaften und ihrer Vorgehensweise. Es geht nicht um ein Verständnis dessen, was die Natur in ihrem Inneren zusammenhält, sondern um die Erreichung bestimmter Zwecke durch zielgerichtete Nutzung der beobachtbaren Naturkräfte und Regelmäßigkeiten. Diese sind keinesfalls beliebig, aber durchaus durch Veränderungen an Material und Energiefluß beeinflussbar. Mit der Methode der Intervention wird stets eine neue Realität geschaffen, die aber auf dem Beziehungsmuster der vorgegebenen Realität (unabhängig davon ob man diese wirklichkeitsgetreu erkannt hat) aufbaut. Zudem bietet das funktionale Konzept einen passenden Rahmen für probabilistische Ansätze, ohne deterministische Beziehungen auszuschließen (Endpunkt eine Wahrscheinlichkeitsfunktion).

### *Illustrationen zum funktionalistischen Konzept der Kausalität*

Diese Überlegungen zu einem funktional-pragmatischen Modell der Kausalität waren in der Diskussion in unserer Klasse Ausgangspunkt für einen differenzierten Disput und für die Erörterung verschiedener Anwendungsbeispiele, auf die ich kurz eingehen will.

- Herr Lucas hat sich besonders mit dem Thema Modellbildung und Werkstoffeigenschaften (auch auf Bauwerke bezogen) befaßt und Beispiele für die „begrenzte Kausalität“ – wie er es genannt hat – vermittelt. Im Einklang mit dem dritten hier thematisierten Modell der Kausalität hat er das moderne Verständnis der Technikwissenschaften als „funktional-stochastisch“ und „auf eine Zielorientierung hin orientiert“ charakterisiert.
- Herr Dössel, der aus dem Blickwinkel des Ingenieurs Diagnose und Therapie von Krankheiten betrachtet, hat sich intensiv mit der Elektrophysiologie des Herzens bei Transplantationen beschäftigt und in seinem Beitrag deutlich gemacht, daß wir eben doch von stochastischen Beziehungsmustern ausgehen *müssen* und eine reine Determinanz im Bereich des Organischen nicht vorliegt. Eine Stelle aus seinem Papier würde ich gern vorlesen, weil das zur Diskussion anregt. In seinem Hintergrundpapier zitiert er S. Laureys aus *Spektrum der Wissenschaft* (Februar 2006): „Der Tod ist eine superkritische Hopf-Bifurkation.“ So hat, glaube ich, noch niemand den Tod charakterisiert. In Bezug auf Probabilistik führt er weiter aus: „Der Übergang zwischen strenger Kausalität und Zufall ist gleitend: er führt über bedingte Wahrscheinlichkeiten. Ein Mensch mit starker erblicher Disposition wird mit größerer Wahrscheinlichkeit erkranken als ein anderer. Die Bayes-Methode ermöglicht bei Kenntnis der einzelnen und verknüpften Wahrscheinlichkeiten eine Schätzung der Ursache aus der Wirkung.“



- Herr Bergmeister hat sich dem Bereich Konstruktion und Bauen zugewandt. Er thematisiert operative Versagenswahrscheinlichkeiten als Entscheidungshilfe für die Tragfähigkeit von Bauten. Die Vorstellung, ein Bauwerk sei sicher oder unsicher, ist einer probabilistischen Betrachtungsweise gewichen: in der Konstruktion wird ein Zielwert eingegeben, den man erreichen muß. Beispielsweise könnte dies eine Versagenswahrscheinlichkeit von  $10^{-6}$  sein. In jedem Falle verbleibt ein Restrisiko. Dazu der Autor selbst: „Auch im Bauwesen, sowie im Konstruktiven Ingenieurbau geht man nicht von der reinen Kausalität, sondern von kausalen Zusammenhängen, basierend auf erkenntnistheoretischen Erfahrungsprozesse aus, die in den sogenannten Elementarsätzen [...], Konstatierungen [...], Beobachtungen [...] oder Basissätzen [...] ihre sprachliche Interpretation finden.“ Hier also wird Sprache selbst als Gestaltungsmerkmal für die Bezeichnung und Identifizierung kausaler Prozesse eingeführt.
- Ähnliche Überlegungen finden sich im Papier von Herrn Klocke, der uns Kausalität in den Produktionswissenschaften vorgestellt hat. Im Vordergrund seiner Ausführungen steht der Begriff der unscharfen Logik, die wiederum stochastische Modelle der Realitätsbeschreibung bedingt. Ich zitiere aus seiner schriftlichen Fassung des Vortrages: „Die Modellierung von Wertschöpfungsketten erfolgt in der Produktionswissenschaft in erster Linie vorwärtsgerichtet. Aus der Anwendung unserer Modelle und Methoden sowie der wechselseitigen Abhängigkeiten leiten wir ab, daß bestimmte“ – und jetzt würde ich einsetzen: ‚kulturell definierte‘ – „Zielgrößen sicher erreicht werden können. Wir postulieren *Kausalitätserwartungen*.“
- Herr Hüttl hat sich in seinem Beitrag zur Kausalität des Themas „Waldsterben“ angenommen. Dort beobachten wir ein Phänomen, das ich häufig als Ambiguität oder Ambivalenz in der Interpretationen kausaler Strukturen bezeichnet habe. Ambivalenz bedeutet Mehrdeutigkeit der Auslegung von Informationen und deren Zusammenhänge. Häufig will man aus den Daten etwas herauslesen, selbst wenn die Resultate der Forschungen andere Interpretationsmöglichkeiten nahe legen. Herr Hüttl schreibt: „Das überraschende Ergebnis häufig stark beschleunigten Waldwachstums, das den Ansatz „Waldsterben“ auf den Kopf zu stellen scheint, muß wohl als Hinweis gewertet werden, daß aufgrund der Dominanz bestimmter Arbeitshypothesen bei der kausal-analytischen Untersuchung der neuartigen Waldschäden der Blick zu stark verengt war und damit wichtige Fragen nicht gestellt bzw. untersucht wurden und gelegentlich Ergebnisse, die nicht in den „Waldsterben-Kontext“ paßten, zumindest teilweise unberücksichtigt blieben“. Dieses Zitat zeigt, daß Ursache und Wirkung oft im Auge des Betrachters liegen, gleichzeitig aber die unabhängige Messung und Beobachtung

von Phänomenen zumindest Zweifel an einer rein konstruktivistischen Sichtweise von Ursache und Wirkung aufkommen lassen.

- In der heutigen Sitzung erlebten wir dann noch zwei interessante Vorträge: einen von Herrn Schubert aus der Verfahrenstechnik über die Sterilisierung und Pasteurisierung von Lebensmitteln; und einen anderen von Herrn Wagemann über Kausalität in der Halbleitertechnik, wo auch auf atomarer Ebene, also jenseits der subatomaren Quantenphänomene, Unsicherheiten eine bedeutende Rolle spielen.

## *Zusammenfassung*

Kausalität ist und bleibt ein integraler Bestandteil unseres Denkens, unseres Verständnisses von Vorgängen in der Welt und unserer Sprache. Der Linguist Frances Pinter hat verdeutlicht, daß alle Schriftsprachen, die er untersucht hat, immer kausale Strukturen kennen. Er hat keine Sprache identifizieren können, die Kausalität nicht als Strukturmerkmal aufgewiesen hätte. Das „Warum-Denken“ ist also tief in unserer Lebenswelt verankert und ein Teil unserer Lebenswirklichkeit.

Trotz dieses lebensweltlichen Bezuges liegt ein universell akzeptables Konzept von Kausalität nicht vor. Darüber bestand wohl auch bei der Debatte zu diesem Thema im letzten Jahr schon Konsens. Alle Konzepte, die es gibt, haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Besonders problematisch erscheinen die beiden Extreme: der objektive Kausalitätsbegriff mit einem eher naiven Naturalismus, und umgekehrt der rein konstruktivistische Begriff, bei dem Kausalität nichts weiter ist als eine kulturelle Zuschreibung. Parallel dazu verläuft die Debatte über Determinismus versus Probabilismus, die ebenfalls zu einer Vielzahl nebeneinander existierender Positionen geführt hat.

Wir glauben, für den Anwendungsbereich der technologischen Systeme ist ein weniger ambitioniertes Konzept einer interventionistisch-funktionalen Kausalität ausreichend. Damit sind die andere Kausalitätskonzepte nicht ausgeschlossen; sie mögen für andere Bereiche ihre Gültigkeit besitzen. Das Konzept der interventionistisch-funktionalen Kausalität ausreichend vermeidet viele der Probleme, die wir mit den anderen Konzepten haben. In dieses Konzept sind probabilistische Konzepte sehr gut integrierbar. Es gibt viele Anwendungsbeispiele in der Technik, bei denen sich dieses Konzept als grundlegendes Strukturmerkmal nachweisen läßt und es auch explizit das Denken, das Handeln und auch die Tätigkeiten des Ingenieurs sinngebend motiviert hat.

Schließen möchte ich mit einem Zitat aus den Ausführungen von Herr Lucas: „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 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.“

Ich danke Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit.