

Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften

Akademie-Debatten

Herausgeber der Reihe „Akademie-Debatten“: Der Präsident der Berlin-Brandenburgischen
Akademie der Wissenschaften

Herausgeber des Bandes: Klaus Lucas, Sekretar der Technikwissenschaftlichen Klasse

Redaktion: Freia Hartung

Satz: Kathrin Künzel

Umschlag: Irene Pranter, Berlin

Druck: Oktoberdruck, Berlin

© Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin 2007

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Herausgebers gestattet.

ISBN-978-3-939818-08-3

Kausalität in der Technik

*Vorträge im Rahmen der Wissenschaftlichen Sitzungen
der Technikwissenschaftlichen Klasse
am 24. Februar, 5. Mai und 18. Oktober 2006*

Konzeption: Klaus Lucas

<i>Klaus Lucas</i>	
Einleitung.	7
<i>Ortwin Renn</i>	
Kausalität aus der Perspektive der technischen Wissenschaften	13
<i>Hans-Günther Wagemann</i>	
Grenzen der Kausalität in der Halbleitertechnik.	21
<i>Helmar Schubert</i>	
Kausalität in der Verfahrenstechnik, dargestellt am Beispiel der Bio- und Lebensmittelverfahrenstechnik	29
<i>Fritz Klocke</i>	
Kausalität in der Produktionswissenschaft	45
<i>Konrad Bergmeister</i>	
Kausalität im Konstruktiven Ingenieurbau	55
<i>Olaf Dössel</i>	
Kausalität bei der Entstehung, der Diagnose und der Therapie von Krankheiten – aus dem Blickwinkel des Ingenieurs.	69
<i>Reinhard F. Hüttl</i>	
Die „neuartigen Waldschäden“ – ein Fallbeispiel zur Kausalitätsfrage	81
<i>Dieter Mewes</i>	
Beispiele aus der Verfahrenstechnik zum Erläutern des Kausalitätsbegriffs	91
<i>Bernd Scholz-Reiter/Jan Topi Tervo</i>	
Kausaler Zusammenhang zwischen Komplexität und Dynamik in der Produktion.	105
<i>Walter Michaeli</i>	
Kausalität in der Kunststofftechnik	121
Autoren	143

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 Bahnbeziehung 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.

Ortwin Renn

Kausalität aus der Perspektive der technischen Wissenschaften

Einleitung

Unter dem Begriff der Kausalität soll hier eine Beziehung zwischen einem Phänomen A und einem Phänomen B verstanden werden, wobei A als notwendige (und hinreichende) Bedingung für das Auftreten von B verstanden wird. Diese klassische Auffassung von Kausalität orientiert sich an dem Alltags-Verständnis von Ursache-Wirkung, wie es in nahezu allen sprachlichen Systemen der Welt in Form von „wenn – dann“ oder weil – deshalb“ Aussagen zum Ausdruck kommt. Die Annahme von Kausalität ist ein universelles Merkmal nahezu aller untersuchten Sprach- und Denkkulturen der Welt.

Für eine nähere Bedeutungsanalyse von Kausalität ist eine Reihe von unterschiedlichen Konzepten zu differenzieren:

- Aristoteles führte vier verschiedene Arten von „Ursachen“ (*aitiai*) auf:
 - *causa materialis*: die Materialursache
 - *causa formalis*: die Formursache
 - *causa efficiens*: die Wirkursache
 - *causa finalis*: die Zweckursache
- *Naturgesetzmäßigkeit versus und Handlungsintention* (strukturell versus intentional): Grundsätzlich kann man unterscheiden in intentional (Absicht als Grund: Ich gehe ins Bett, weil ich müde bin) und strukturell (hier ist die Kausalität in dem Phänomen selbst angelegt: Ich bin müde, weil ich eine Schlaftablette mit dem Wirkstoff X eingenommen habe).
- *Ontologisch versus konstruktivistisch*: Im ersten Fall wird angenommen, dass die kausale Beziehung im Phänomen selbst angelegt ist, im zweiten Fall wird dagegen postuliert, dass es sich um eine mentale Zuschreibung von Wissens-elementen in eine kausale Ordnung handelt.
- *Deterministisch versus probabilistisch*: Im ersten Fall wird angenommen, dass die kausale Beziehung eineindeutig ist, im zweiten Falle gibt es zwischen der Ursache und der

Wirkung andere Einflussnehmende Faktoren, die entweder prinzipiell oder aus mangelndem Wissen nicht erkannt werden.

Auf die beiden letzten Aspekte soll in den folgenden Kapiteln näher eingegangen werden. Dabei stehen folgende Fragen im Vordergrund des Interesses:

- Sind kausale Strukturen in der Natur der Phänomene selbst angelegt oder sind sie kulturelle Zuschreibungen (mental constructs)?
- Können wir kausale Strukturen empirisch messen oder sind es nicht verifizierbare Axiome unseres a priori-Denkens oder eine Kombination von beidem?
- Sind kausale Strukturen deterministisch oder probabilistisch oder beides?
- Sind kausale Strukturen intentional mit dem Willen verknüpft oder in der Natur selbst als Prinzip angelegt?

Das ontologische 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_n 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 methodologische 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 Kontroll-design 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 schwer vorstellbar.

Das konstruktivistische Konzept der Kausalität

In diesem Konzept ist Kausalität ein mentales Hilfsmittel der Vernunft: Es ist die Bedingung für Erfahrung (Hume), 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 Leistung 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 die Möglichkeit intersubjektiver Übereinstimmung, die aber nicht den Grad der Objektivität, sondern den Grad der Plausibilität messen.
- 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 des ontologischen Konzepts. Im Vordergrund steht die Kritik am 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 Abschlussfähigkeit 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 Phänomen 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. „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“ (Kausalität im Süden. In: Soziale Systeme 1 [1995] H. 1, S. 7–28).

Deterministisches versus probabilistisches Konzept

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 erklärenden 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 Nicht-linearitäten vor allem bei Phasenübergängen chaotische Wirkmuster auftreten, die einer Prognose nicht oder nur teilweise zugänglich sind.

Probabilistische Phänomene können gedanklich auf folgende Ursachen zurückgeführt werden:

- Unzureichendes Wissen (Determinismus bleibt als Grundschema erhalten).
- Unerreichbares Wissen (Modell des Determinismus bleibt als Ideal bestehen, kann aber nach menschlichem Ermessen auch bei zusätzlichem Wissen nie erreicht werden).
- Genuine stochastische Prozesse (ein Determinismus liegt auch in der Struktur der Phänomene nicht vor).

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.

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 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 einem Wachsflügel).
- 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, sich selbst-erfüllende Prophezeiung, etc.).
- Das Problem der Unterscheidbarkeit zwischen Korrelation und Kausalität bleibt erhalten, wird aber abgeschwächt.

Zusammenfassung

Kausalität ist ein integraler Bestandteil unseres Denkens und unserer Sprache, der tief in der Lebenswelt verankert ist. Dennoch liegt ein universell akzeptiertes Konzept der Kausalität nicht vor. Intentionale, ontologische, konstruktivistische, deterministische und probabilistische Konzepte stehen teils in Ergänzung teils in Konkurrenz zueinander. Grundsätzlich kann Kausalität eine Eigenschaft von Phänomenen unabhängig vom Erkennen des Menschen sein; dagegen steht der konstruktivistische Ansatz, der Kausalität als ein Instrument des Wissens, der Zuordnung von Phänomene durch den menschlichen Geist ansieht.

Beide Ansätze haben ihre Plausibilität, aber auch Probleme ihrer Verallgemeinerungsfähigkeit. Dazu kommt das Problem der Eindeutigkeit der Zuordnung: mehr und mehr scheint unser Wissen durch Wahrscheinlichkeitsaussagen bestimmt. Zwischen Ursache und Folgen stehen komplexe Wirkungsketten, die entweder grundsätzlich oder durch die Begrenzungen unseres Wissens eine eindeutige Zuordnung von Ursache und Wirkung nicht zulassen.

Für die technischen Wissenschaften erscheint eine pragmatische Vorgehensweise in der Frage der Kausalität angebrachter. Anstatt Aussagen über die Natur zu machen, werden kausale Aussagen verstanden als Aussagen über die Wirksamkeit von Interventionen in die Natur. Wirksamkeit misst sich dabei an dem Grad der Zielerreichung vorher bestimmter Zwecke. Dazu passt ein Zitat des Psychoanalytikers C. G. Jung: „Wirksam ist, was wirkt. Das müssen diejenigen, die immer nach der objektiven Wahrheit rufen, schmerzhaft erfahren“.

Hans-Günther Wagemann

Grenzen der Kausalität in der Halbleitertechnik

Da die Zahl beteiligter Atome oder Moleküle bei technischen Betrachtungen meist sehr groß ist, verwendet man zusammenfassende „Zustandsvariable“ der großen Zahl, wie Temperatur, Druck, Energie, Dichte, Geschwindigkeit und andere. Der Ablauf eines Vorganges wird in diesem Rahmen von Zustandsvariablen meist streng „kausal“ und oft recht einfach ablaufen. Das mikroskopische Bild eines Zustandes dagegen ist weitaus komplizierter: hätte es doch die Bewegungsgleichungen einer nahezu unendlich großen Zahl von beteiligten Individuen zu beschreiben, nämlich stets von mehr als 10^{23} Mitwirkenden! In unserer „natürlichen“ Umgebung ist die zusammenfassende und vereinfachende Zustandsbeschreibung meist angemessen. Die womöglich nicht vollständig kausale Beschreibung eines einzelnen mikroskopischen Einzelprozesses verschwindet in der mittelwertbildenden Aussage aller anderen über den wahrscheinlichen Ablauf. Allerdings ändern sich diese Verhältnisse dramatisch, wenn die große Zahl dahinschwindet. Machen wir uns das an einem einfachen Beispiel klar.

Studierende jeder Anfangsvorlesung werden leicht durch die Frage verblüfft „Wie kalt ist eigentlich der freie Weltraum außerhalb des Sonnensystems?“ (Abb. 1). Die meisten vermuten die Temperatur nahe dem absoluten Nullpunkt. Die Zusatzfrage, ob man das nachweisen kann, führt auf die richtige Antwort. Die wenigen schnellen Teilchen im freien Weltraum stehen untereinander nicht im energetischen Gleichgewicht. Wenn ein Thermometer beliebiger Art sich mit der geringen Strahlung aus der Umgebung ins Gleichgewicht zu setzen versucht, stellt sich ein für diese Messung charakteristischer, aber zeitlich nicht konstanter Wert der Temperatur ein. Auch für das Thermometer mit seiner Masse inmitten der wenigen Teilchen bleibt die Temperatur undefiniert. Eine Maxwell-Geschwindigkeitsverteilung der beteiligten, sich untereinander stoßenden und kinetische Energie austauschenden Teilchen beschreibt für die wenigen Teilchen des freien Weltraums nur sehr ungenau eine jeweils im „Ensemble“ gemeinsame Temperatur eines Gleichgewichtes.

Situationen wie die folgenden sind für die heutige Festkörpertechnik charakteristisch, wenn man bei einer geringen Zahl beteiligter Individuen in Form von Gitteratomen in dünnsten Schichten ankommt. Oder: wenn mit wenigen Elementarladungen in kleinsten



Abbildung 1
Eineinhalb Millionen Lichtjahre ist der Andromeda Nebel von uns entfernt.
Welche Temperatur herrscht im Weltraum auf halbem Wege?

Speichern ein Signal zu speichern ist. Schließlich: wenn von statistischen Störungen im Gitterverband eines Kristalls Materialkonstanten bestimmt werden. Wir beschäftigen uns vielfach in unseren technischen „Nano-Welten“ mit nur mühsam kausal ablaufenden Prozessen, die auf Grund der geringen Zahl beteiligter Partner nicht immer ihren abschätzbar „wahrscheinlichen“ Verlauf nehmen.

Beginnen wir mit den berühmten „soft-errors“ der frühen Speichertechnik der Mikroelektronik. „Speicher“ sind dabei Plattenkondensatoren auf dem Halbleiterchip. Ein Plattenkondensator besteht ursprünglich aus zwei sich gegenüberstehenden Metallplatten, zwischen denen ein Isolator wie eine dünne Glimmerschicht vorhanden ist. Hier sind es zwei Halbleiter-Platten, und zwischen ihnen liegt eine dünne Schicht Siliziumdioxid. Das gespeicherte Medium ist elektrische Ladung, die sich elektrisch erhöhen und verringern lässt (Abb. 2). Wenn zum Beispiel die Spannung U am Eingang des Kondensators unter Null absinkt, also $U < 0$ gilt, wird auf der Gegenseite positive Ladung $Q > 0$ gespeichert. Dieser positiven Ladung Q kann man dann beispielsweise eine logische „1“ zuordnen. Als die Abmessungen der Speicherzellen so klein wurden, dass die ordnungsgemäß gespeicherte Ladung, zum Beispiel für eine logische „1“, ungefähr der Ladung entsprach,

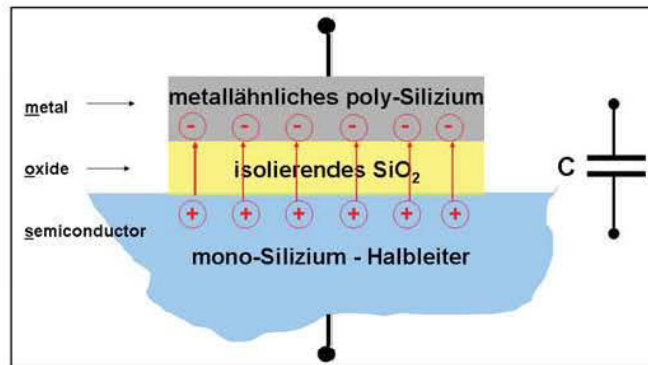


Abbildung 2

MOS-Plattenkondensator als integriertes Speicherelement (MOS ~ metal-oxide-semiconductor). Bei einer Fläche von $0,1\mu\text{m}^2$ und einer Dicke der SiO_2 -Schicht von 10nm lassen sich mit einer Spannung von 2V ca. 6000 Elementarladungen in dem Kondensator mit der Kapazität C speichern.

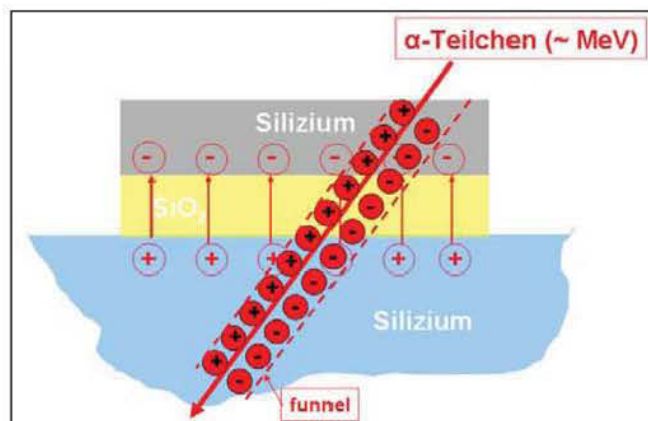


Abbildung 3

Soft error mit „ion funneling“ beim Einfall eines hochenergetischen α -Teilchens über alle Bereiche des Speicherelementes mit Veränderung in der Ladung Q

die ein auftreffendes hochenergetisches Teilchen als Ionenspur im System hinterlässt, geriet der Speicher hin und wieder in zunächst unerklärlicher Weise in Unordnung. Als Ursache erkannte man bald die Gamma-Quanten der kosmischen Höhenstrahlung, aber auch Alpha-Partikel aus dem meist keramischen Trägermaterial des Halbleiterchips. Diese „soft-errors“ aufzuklären und heutzutage weitgehend abzustellen, hat sehr viel Arbeit gekostet (Abb. 3).

Der Beginn der Unsicherheiten, nämlich ob „0“ oder „1“ in einer Speicherzelle steht, ist charakteristisch für die Auflösung kausaler Zuordnungen in miniaturisierten Systemen. Das typische heutige Speicherelement ist ein winziger Plattenkondensator mit SiO_2 -Dielektrikum und zwei Silizium-Elektroden bei einem Plattenabstand von 10 Nanometern und einer Fläche von 0,1 Quadratmikrometer. Man errechnet dafür eine Kapazität von $0,3 \cdot 10^{-15}$ Farad oder 0,3 Femtofarad, und bei einer Schaltspannung von -2 Volt speichert man weniger als 10^4 Elementarladungen als Information. Die vergleichbare Anzahl von Ladungen erzeugt ein Alpha-Teilchen auf seiner Abbremsspur von wenigen Mikrometern, die bei enger Packung der Speicherzellen durch eine oder mehrere Zellen führt und die Information zum Beispiel von „1“ auf „0“ umsetzen kann (Abb. 3).

Nicht nur Maßnahmen der Festkörpertechnologie, nämlich unter anderem die Wahl geeigneter synthetischer Substrat-Materialien, sondern auch Maßnahmen des dynamischen „refreshing“ der Speicher-Information, also des periodischen Wiedererzeugens der ansonsten verschwindenden gespeicherten Ladung, führten zur heutigen Beherrschung der „soft-errors“. Allerdings hört man immer wieder von unerwarteten Störungen der Halbleiterspeicher beim interkontinentalen Flug am Rande der Stratosphäre auf Grund der dort hohen Flüsse kosmischer Strahlung.

Ein weiterer Hinweis auf die sich auflösende Zuordnung kausaler Zusammenhänge in der Halbleitertechnik angesichts geringer Zahlen von zusammenwirkenden Partnern im atomaren Bereich ist die Beobachtung der sich über die Jahre hinweg stetig verringernden Eigenleitendichte n_i des Siliziums. Diese Größe beschreibt eine der wichtigsten Halbleitereigenschaften: das Gleichgewicht der freien Ladungsträger beider Arten (Elektronen und Löcher). Genau wie das Ionenprodukt des Wassers definiert ist und die Konzentrationen der H^+ - und OH^- -Ionen nach dem Massenwirkungsgesetz in einem multiplikativen Gleichgewicht zueinander stehen und den pH-Wert bestimmen (<7 : mehrheitlich H^+ -Ionen und saures Verhalten; >7 : mehrheitlich OH^- -Ionen und basisches Verhalten), so gilt eine entsprechende Aussage für die Ladungsdichten der Elektronen n und der Löcher p im Halbleiter: $n \cdot p = n_i^2$. Dem pH-Wert entspricht in diesem Sinne der Wert der Dichten n oder p bei Elektronen- oder Löcher-Leitung und deren jeweils im Gleichgewicht dominierender Dichte beim n-Halbleiter $n > n_i$ oder beim p-Halbleiter $p > n_i$. Seit 1965 hat sich nun der durch genaue Messungen an Reinst-Silizium bei $T=300\text{K}$ gewonnene Wert von $1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ schrittweise auf $0,965 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ im Jahre 2003 verringert [1], also auf ca. 60 % des ursprünglichen Wertes, nicht unbedingt als Ergebnis verbesserter Messtechnik (Abb. 4).

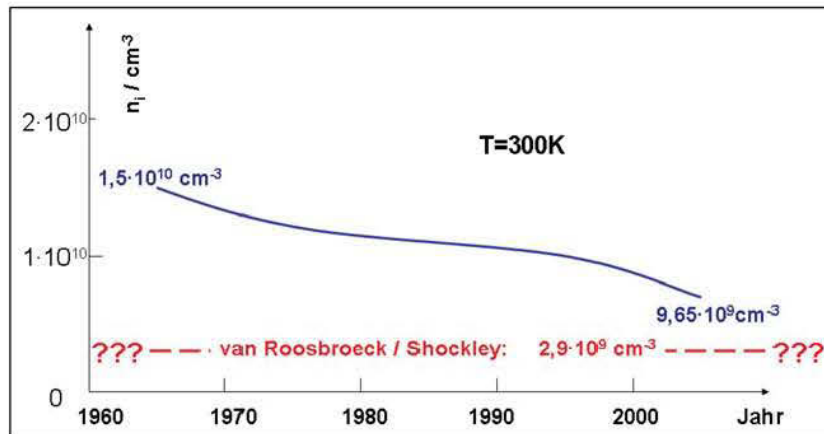


Abbildung 4
Verringerung der Eigenleistungsdichte n_i des Siliziums im Zeitraum 1965–2002

Woran mag diese für die Fachwelt unerwartete Verringerung liegen? Eine theoretische Abschätzung des Wertes n_i ist nach dem berühmten Prinzip von W. van Roosbroeck und W. Shockley [2] aus dem Jahre 1954 möglich. Die beiden Forscher betrachten die Emission von Strahlung als Umkehrung des Vorganges von Absorption, und ermitteln daraus die Emission aus dem Halbleitermaterial mit ihrer Eigenart. Die Methode war sehr erfolgreich bei der Ermittlung von technisch-nutzbaren Halbleitern für Lumineszenz-Dioden. Exakt gilt bei so genannten „direkten“ Halbleitern, dass beide gegenläufigen Vorgänge, die Absorption und die Emission von Photonen, sich quantitativ entsprechen. Bei Silizium als „indirektem“ Halbleiter ist das Prinzip nur eingeschränkt richtig: nicht-strahlende Übergänge mit Phononen-Mitwirkung stören die Bilanz. Für eine Abschätzung der Eigenleistungsdichte n_i jedoch kann man beim Silizium alle bekannten Übergänge miteinander verrechnen. Der damit gewonnene Wert liegt für Silizium bei $n_i(T=300\text{K}) = 2,9 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$. Ob er als „Konstante“ verlässlich ist, bleibt derzeit offen. Obwohl sich der experimentelle Wert tendenziell dem theoretischen nähert, bleibt die Spanne zwischen Experiment und Theorie immer noch beträchtlich.

Eine Erklärung für die beobachtete Verringerung des n_i -Wertes könnte sein, dass über die Jahre hinweg das einkristalline Reinst-Silizium immer perfekter hergestellt wird. Das bezieht sich nicht nur auf den Fremdstoffgehalt, den man beim Zonen-gereinigten Reinst-Silizium (FZ-Si) so perfekt beherrscht wie bei keinem anderen Werkstoff: es gelingt heute, Silizium herzustellen mit der Reinheit von $1:10^{-10}$, das heißt mit 1 Fremdatom auf 10

Milliarden Silizium-Atome! Hier geht es nun vor allem um die Dichte der nicht ordnungsgemäß eingebauten Gitteratome, vor allem um die so genannten Frenkel-Defekte, die als Punkt-Defekte jeweils ein Zwischengitteratom und eine Leerstelle umfassen, weniger um die Schottky-Defekte, bei denen Atome an die Oberfläche verlagert werden (Abb. 5). Jeder Temperatur entspricht nun eine Gleichgewichtsdichte der Frenkel-Defekte, deren theoretischer Wert sich aus Betrachtungen der Entropie als Maß für die thermodynamisch notwendige „Unordnung“ ermitteln lässt. Die thermischen Gitterschwingungen verlagern bei jeder Temperatur eine bestimmte Zahl von Gitteratomen auf Zwischengitter-Plätze. Experimentell lässt sich der Gleichgewichtswert der Frenkel-Defekte – von hohen Temperaturen kommend, wie es beim Kristall-Ziehen der Fall ist – bei tiefen Temperaturen nicht so leicht einstellen; denn es handelt sich um eine verringerte und zudem statistisch verteilte Anzahl von Defekten. Man wird sehr vorsichtig den fertigen Einkristall abkühlen müssen, um nicht eine Defektdichte höherer Temperatur „einzufrieren“. Dieses vorsichtige Abkühlen unter Schutzgas zieht sich unter Umständen über Wochen hin. Nur geringe Anteile der statistisch verteilten Frenkel-Defekte bei hoher Temperatur sollten bei Zimmertemperatur nach Rechnung verbleiben. Die Zwischengitteratome müssen dabei ihre regulären Gitterplätze wieder finden. Um dahin zu kommen, bedarf es nahezu alchimistischer Vorgehensweise mit Temperatursteuerung und katalysierender Gas-Umgebung, um für das thermodynamische Gleichgewicht die Zwischengitteratome wieder auf Leerstellen zurückzubringen.

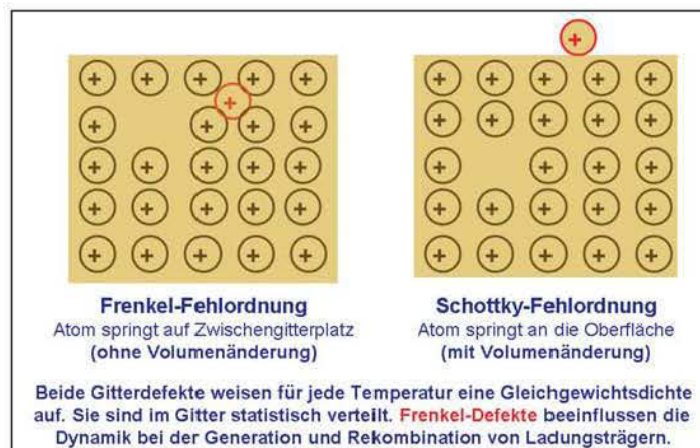


Abbildung 5
Frenkel- und Schottky-Defekte im Kristallgitter

Jede Messung der Eigenleitungsdichte ist mit Nichtgleichgewicht-Experimenten verbunden, bei denen zum Beispiel durch vorsichtige Lichteinstrahlung zeitweise mehr Ladungsträger beider Arten als im Gleichgewicht erzeugt werden und deren Abbau durch „Rekombination“ verfolgt wird. Rekombination bedeutet dabei die Wiedervereinigung der durch Strahlungsenergie freigesetzten Ladungsträger-Paare. Abweichungen vom perfekten Gitter erleichtern die Vereinigung von Ladungsträgern des Nicht-Gleichgewichtes. Die Rekombination erfolgt umso leichter, je mehr Frenkel-Defekte als Katalysatoren im Gitter vorhanden sind, was dann den n_i -Wert steigen lässt.

Messen wir über die Jahre hinweg in Form der stetig verringerten Konstanten n_i der Eigenleitungsdichte die sich stetig verbessernde Technik der Silizium-Abkühlung und die sie begleitende, immer perfektere Defekt-Ausheilung? Betrachten wir hier einen technisch bislang nicht völlig beherrschbaren Vorgang, ein kleine Störung der technologischen Kausalität, bei der ansonsten perfekt gehandhabten Technologie des Siliziums?

Schließlich möchte ich für die nicht kausal erfolgenden Ereignisse der Festkörperelektronik die „technologischen Einbrüche“ einer ganzen Bauelement-Fabrikation nennen, die von Zeit zu Zeit jedes Halbleiterlabor, auch die perfekttest organisierte Industrietechnologie, heimsuchen und für die zunächst einmal keine rationalen Gründe angeführt werden können. „Technologischer Einbruch“ steht für „... wir wissen nicht, warum ...“. Der unerwartete Niedergang des „yield“, der Ausbeute der Fertigung, der bei einer gut „eingefahrenen“ Technologie ohne weiteres über 95 % liegt, lässt Schlimmes ahnen. Im Sinne einer langen Kausalkette allmählich zurückzugehen und Ursachen aufzudecken, gelingt meist nicht und dauert auch zu lange. Zu stark verzweigt sind die Möglichkeiten, wie sich Unregelmäßigkeiten in den streng kontrollierten Betrieb einer Reinraum-Technologie eingeschlichen haben können, zu gering das Maß der Verunreinigungen, die eine ganze Produktion scheitern lassen. Es hat Fälle gegeben, bei denen man als Folge „technologischer Einbrüche“ eine gänzlich neue Technologie aufgebaut hat. Im Allgemeinen fängt man ganz vorn in der Kausalkette an und vertraut auf die Kraft des Neuanfanges.

In einem deutschen Halbleiterwerk stellte sich heraus, nachdem man längere Zeit mit einem nicht identifizierbaren „technologischen Einbruch“ bei ungefähr jedem zwanzigsten, dreißigstem Wafer gelebt hatte, dass eine besonders eifrige Mitarbeiterin regelmäßig Wafer vom geschützten Produktionsband nahm und sie genauester visueller Inspektion unterzog – fünf Zentimeter entfernt von ihrer Nase mit einer Schutzmaske aus Papier. Die Natrium-Ionen des Atems reichten trotz der Nasenmaske für den Totalausfall aller Bauelemente auf den besonders genau inspizierten Wafers (Abb. 6).

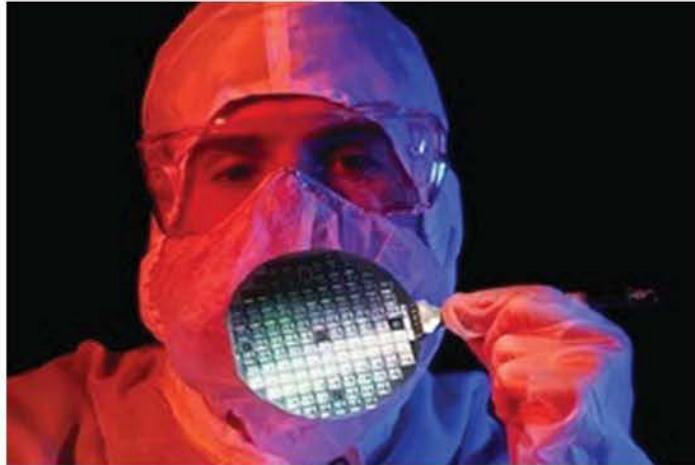


Abbildung 6

Bei der Chip-Produktion sollte man zu nahen Kontakt mit den ungeschützten Wafern vermeiden!

Auch hier existiert eine vom handelnden Menschen nur unzureichend verfolgbare Kausalkette. Zunächst gilt: je geringer die Menge bearbeiteten Werkstoffs, umso höher der Durchgriff der Mikrovorgänge mit ihren Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Aber auch: je präziser über Mikrovorgänge Aussagen gefordert werden, umso mehr erkennt man deren Anfälligkeit durch unerwartete und unübersichtliche Einflüsse. Schließlich: je besser man eine technische Produktion als viel verzweigte Kausalkette beherrscht, umso folgenreicher ist ein unerwarteter, „akausaler“ Eingriff des Menschen, sozusagen von außerhalb der Grenzen des betrachteten Systems.

Literatur

- [1] Altermatt, P. P., Schenk, A., Geelhaar, F. & G. Heiser: J. Appl. Phys. 93 (2003), p.1598 u. f.
- [2] van Roosbroeck, W. & W. Shockley: Phys. Rev. 94 (1954), p.1558 u. f.

Helmar Schubert

Kausalität in der Verfahrenstechnik, dargestellt am Beispiel der Bio- und Lebensmittelverfahrenstechnik

1 Einführung

Verfahrenstechnik (process engineering, chemical engineering) ist Stoffumwandlungstechnik und behandelt technische Prozesse, in denen Stoffe nach Art, Eigenschaft und/oder Zusammensetzung verändert und für den gewünschten Gebrauch gestaltet werden. Einige Beispiele sind die Herstellung von Kraftstoff und Kunststoffen aus fossilen oder nachwachsenden Rohstoffen, von (funktionellen) Lebensmitteln aus pflanzlichen oder tierischen Rohprodukten sowie von pharmazeutischen Wirkstoffen aus den Ausgangsstoffen. Für alle verarbeiteten Stoffe ist Verfahrenstechnik erforderlich. Darüber hinaus wird diese Disziplin in vielen anderen Fachbereichen benötigt, beispielsweise um Stoffänderungen wie bei der Lebensmittelfrischhaltung zu vermeiden, um Energie bereitzustellen oder um Anlagen zu planen und zu bauen.

Aus wissenschaftlicher Sicht ist Verfahrenstechnik die Ingenieurwissenschaft der Stoffumwandlung, die im Hinblick auf die gewünschten Materialeigenschaften auch als Produktgestaltung (product engineering) bezeichnet wird. Wie alle Technikwissenschaften nutzt die Verfahrenstechnik die Naturwissenschaften und verwendet ihre Werkzeuge. In einigen Bereichen wie der Thermodynamik hat sie auch maßgeblich an der Weiterentwicklung naturwissenschaftlicher Grundlagen mitgewirkt. Verfahrenstechnik ist auf interdisziplinäre Zusammenarbeit angewiesen. Neben den Naturwissenschaften, den Materialwissenschaften und allen weiteren Technikwissenschaften sind Kooperationen mit den Wirtschafts-, Sozial- und Rechtswissenschaften nötig, um beispielsweise die Akzeptanz von Produkten sowie die Rahmenbedingungen beim Bau und Betrieb von Anlagen berücksichtigen zu können.

Neben der klassischen Einteilung nach den vorherrschenden physikalischen Vorgängen der Grundoperationen in chemische, mechanische und thermische Verfahrenstechnik wird das Fachgebiet auch in Bereiche eingeteilt, die ein engeres Gebiet oder Stoffgruppen umfassen. Beispiele hierfür sind Bioverfahrenstechnik, Grenzflächenverfahrenstechnik,

Energieverfahrenstechnik, Kernverfahrenstechnik und Lebensmittelverfahrenstechnik. Die Vielfalt verdeutlicht die Schwierigkeit, das Fach Außenstehenden darzustellen.

Die Vielfalt ist auch eine der Ursachen für das Problem, die Kausalität in der Verfahrenstechnik in allgemeiner Form zu behandeln. Grundsätzlich kann man die Hypothese aufstellen, dass sich die Kausalität in der Verfahrenstechnik nicht von derjenigen in den übrigen technischen Wissenschaften unterscheidet. Sehr hilfreich ist diese Hypothese allerdings nicht, denn wer könnte für die gesamte Technik diese Frage mit ausreichender Fachkenntnis behandeln? Zweckmäßiger wird es sein, die Kausalität aus der Sicht unterschiedlicher technischer Fachdisziplinen zu diskutieren und an Hand von Beispielen zu erläutern, aus denen auch die unterschiedlichen Vorgehensweisen deutlich werden.

2 Kausalität, erläutert an einem einfachen Beispiel

Kausalität ist die ursächliche Verknüpfung mehrerer Ereignisse, das heißt es existiert eine Beziehung zwischen Ursache und Wirkung. Ein einfaches Beispiel ist die Zerkleinerung grober, zum Sprödebruch neigender Partikel zwischen zwei Walzen. Beim Einzug in den Walzenspalt wird das betrachtete Partikel mechanisch beansprucht, dadurch verformt und ein Spannungsfeld aufgebaut. Bei Erreichen der Bruchbedingung zerbricht das Partikel in einzelne Bruchstücke, die selbst wieder beansprucht und weiter zerkleinert werden können. Das Überschreiten der Bruchlast ist also die Ursache für die Zerkleinerung, es besteht daher eine kausale Verbindung zwischen der angelegten Last, der Bruchbedingung und der resultierenden Zerkleinerung. Vereinfacht ausgedrückt ist die angelegte Bruchbeanspruchung die Ursache für die Zerkleinerung. Diese Kausalität ist bei einem funktionstüchtigen Walzenstuhl zutreffend, liefert jedoch nur eine qualitative Aussage. Eine quantitative Aussage wäre erst aus der Angabe der Partikelgröße bzw. Partikelgrößenverteilung der Bruchstücke möglich, denn die Eigenschaften des zerkleinerten Materials werden in der Regel maßgeblich durch ihre Partikelgröße bestimmt. So entscheidet die Partikelgröße bei Farbpigmenten über die Farbintensität, bei Kakao über den Geschmack von Schokolade und bei vielen Wirkstoffen über die Bioverfügbarkeit. Eine kausale Verknüpfung zwischen der zerkleinerungswirksamen Belastung eines Partikels und dem Zerkleinerungsergebnis, also der resultierenden Größenverteilung der Bruchstücke, ist zumindest ungewiss und auf Grund der Erfahrung und wegen des im Allgemeinen nicht linearen dynamischen Systems nicht zu erwarten. Selbst wenn es eine derartige Verknüpfung gäbe und eine exakt definierte Bruchbelastung aufgebracht werden könnte, wäre das dazu erforderliche Wissen nach heutigen Erkenntnissen unerreichbar. Eine genaue Vorhersage der Bruchstück-

Größenverteilung ist daher für technisch relevante Partikel zumindest heute unrealistisch. In der Zerkleinerungstechnik werden unter Verwendung von Stoffdaten Modelle zur Abschätzung des Zerkleinerungsergebnisses verwendet (Schönert, 2004). Mittels populationsdynamischer Modellierung kann der zeitliche Fortschritt der Zerkleinerung in einer Mahlanlage abgeschätzt werden.

Das Beispiel zeigt, dass es zwar eine kausale Verbindung zwischen der mechanischen Beanspruchung und dem Bruch einer Feststoffpartikel gibt (qualitative Aussage), das Zerkleinerungsergebnis, also die Größenverteilung der Bruchstücke (quantitative Aussage), jedoch nicht genau vorhergesagt werden kann. Die grundlegende Erkenntnis von Ursache und Wirkung zunächst nur als qualitative Aussage ist jedoch entscheidend für eine spätere sinnvolle Näherungslösung. Die Feststellung einer beliebigen Korrelation zwischen Messgrößen ist für einen brauchbaren Näherungsansatz nicht ausreichend, da die Messwerte auch zufällig korreliert sein können.

Das genannte Beispiel ist typisch für viele Fragestellungen in der Verfahrenstechnik. Man muss zunächst die für ein Problem kausalen Einflussgrößen erfassen und kann dann einen Bezug zum Ergebnis herstellen. Hierzu stehen viele Methoden zur Verfügung. Man kann beispielsweise rein empirische oder probabilistische Modelle einsetzen oder Modelle verwenden, die auf physikochemischen Grundlagen aufbauen und Annahmen und Vereinfachungen enthalten. Eine weitere Möglichkeit besteht in der populationsdynamischen Modellierung. In der Regel sind Experimente nötig, um berechnete Werte an die Wirklichkeit anpassen und damit das Ergebnis beschreiben sowie Vorhersagen treffen zu können. Um die Zahl der Experimente möglichst gering zu halten, haben sich dimensionslose Kennzahlen bewährt, die man aus einer Dimensionsanalyse gewinnen kann. Derartige Ähnlichkeits-Kennzahlen sind sehr nützliche Werkzeuge und haben sich für viele Fragen des Scale-up und Scale-down bewährt. Da wegen der meist komplexen Zusammenhänge fast nie eine vollständige Ähnlichkeit erreichbar ist und bei Modellen Annahmen sowie Vereinfachungen nötig sind, verbleibt eine Unsicherheit. Diese Unsicherheit ist die Folge einer nicht bestehenden oder nicht quantitativ beschreibbaren Kausalität.

Die nach dem jeweiligen Stand der Erkenntnis nicht vermeidbare Unsicherheit ist den Nichtfachleuten selten bewusst. Wenn beispielsweise ein Produkt als steril bezeichnet wird, erwartet der Verbraucher, dass darin alle Mikroorganismen inaktiviert bzw. abgetötet sind. Wie ein späteres Beispiel zeigen wird, ist diese Bedingung nach heutigem Wissensstand nicht erfüllbar. Ein Restrisiko bleibt bestehen, das die Verbraucher zu tragen haben. Es ist Aufgabe der Wissenschaft, diese Problematik offen zu legen und der Öffentlichkeit bewusst zu machen.

3 Weitere Beispiele

3.1 Herstellen von Emulsionen durch Tropfenaufruch

Das genannte Beispiel der Zerkleinerung soll weiter verfolgt werden. Zur Vereinfachung wird die Tropfenzerkleinerung durch eine umgebende Flüssigkeit betrachtet. Da sich nach dem Tropfenaufruch stets wieder Kugeln bilden, entfällt als weiterer Parameter der bei Feststoffen notwendige Formeinfluss der Bruchstücke. Die Tropfenzerkleinerung ist für viele Verfahren zur Herstellung von Emulsionen notwendig. Emulsionen sind disperse Mehrphasensysteme, die aus mindestens zwei ineinander nahezu unlöslichen Flüssigkeiten bestehen. Bekanntlich ist Milch eine Öl-in-Wasser(O/W)- und Butter eine Wasser-in-Öl(W/O)-Emulsion. Meist ist es das Ziel des Emulgierens, möglichst kleine Tropfen mit geringem Energieeintrag so herzustellen, dass sich die gewünschten Eigenschaften einstellen. Besonders interessant sind Tropfengrößen unterhalb eines Mikrometers, da dann ein Aufrahmen (O/W) oder Absinken (W/O) der Tropfen vermieden wird. Für eine gute Bioverfügbarkeit schwerlöslicher Wirkstoffe sind Tropfen gewünscht, die noch eine Größenordnung kleiner sind. Es handelt sich dann um Nanoemulsionen.

Theoretisch lässt sich unter bestimmten Vereinfachungen zeigen (vgl. Schubert, 2005), dass die maximale Tropfengröße d_{\max} durch die örtliche Leistungsdichte P_v (dissipierte Leistung pro Volumen) festgelegt ist und durch die Beziehung

$$d_{\max} \propto P_v^{-n_1} \quad (1)$$

beschrieben werden kann. Bei kontinuierlich betriebenen Emulgieranlagen wurde experimentell

$$d_{\max} \propto t_v^{-n_2} \quad (2)$$

gefunden, wobei t_v die mittlere Verweilzeit während der Beanspruchung durch P_v ist. Mit der aus Experimenten ermittelten Näherung $n_1 \approx n_2 \approx n$, der mittleren Energiedichte $E_v = P_v \cdot t_v$ und noch zwei Voraussetzungen erhält man (Karbstein, 1994)

$$d_{\max} \propto E_v^{-n} \quad (3)$$

Im Gegensatz zu P_v und t_v ist die Energiedichte wegen $E_v = P/\dot{V}$ einer einfachen Messung zugänglich, wobei P die eingetragene Leistung und \dot{V} der Volumenstrom der Emulsion bedeuten. Die Beziehung (3) hat sich für viele Anwendungen wie für die Auslegung und Regelung von Emulgieranlagen bewährt, auch wenn es sich nur um eine Näherung

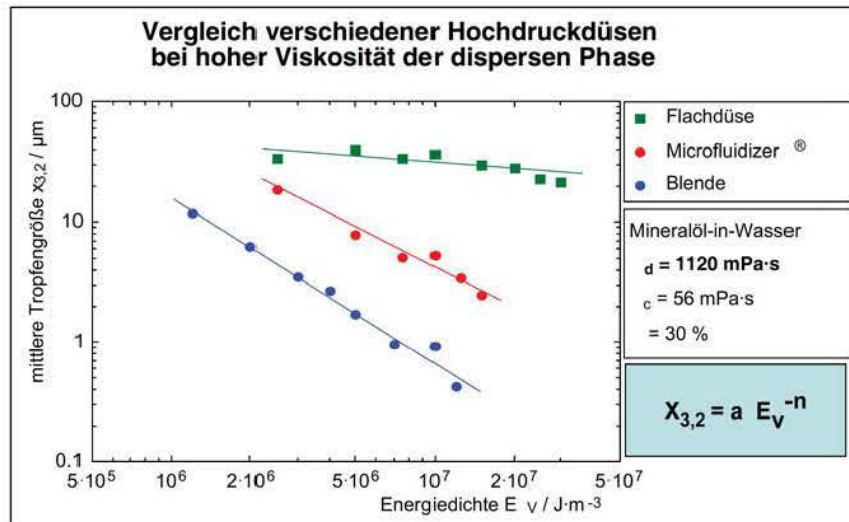


Abbildung 1

Anwendung des Energiedichtekonzepts für das Emulgieren mittels eines Hochdruckhomogenisators (Stang, 1998); $x_{3,2}$ ist der Sauterdurchmesser der Tropfengrößenverteilung

handelt. Abbildung 1 zeigt als Beispiel die Nützlichkeit des Energiedichtekonzepts für den Vergleich unterschiedlicher Düsen bei Hochdruckhomogenisatoren. Da die Exponenten in (1) und (2) nicht genau übereinstimmen, besteht keine kausale Verknüpfung zwischen d_{max} und E_v . Vermutlich ist es daher bisher nicht gelungen, auf Basis der Beziehung (3) eine brauchbare Ähnlichkeitskennzahl zu entwickeln.

Beim Emulgieren müssen die neu gebildeten Tropfen gegen Koaleszenz stabilisiert werden. Durch geeignete grenzflächenaktive Substanzen, den Emulgatoren, kann man die Tropfenkoaleszenz gering halten und mitunter sogar vermeiden (vgl. Schubert, 2005). Durch spezielle Experimente ist es kürzlich gelungen, die Zerkleinerung und die anschließende Koaleszenz getrennt voneinander zu untersuchen (Kempa, Schuchmann & Schubert, 2006). Damit konnte die Brauchbarkeit der Beziehung (3), die nur den Zerkleinerungseinfluss berücksichtigt, bestätigt werden.

Das Beispiel gehört zu den seltenen Fällen in der Verfahrenstechnik, bei denen sich auch ohne kausale Verknüpfung brauchbare Näherungen bewährt haben. Die Beziehung (3), die auch erfolgreich für die Feststoffzerkleinerung, beim Gaseintrag in Flüssigkeiten und für das Schäumen eingesetzt wird, gilt jedoch nur näherungsweise und nur in einem Gültigkeitsbereich, der zuvor für den jeweiligen Anwendungsfall ermittelt werden muss.

3.2 Inaktivieren von Mikroorganismen für das Sterilisieren und Pasteurisieren

Viele Produkte wie Lebensmittel, Pharmazeutika, Kosmetika, Implantate sowie Geräte und Apparate in Medizin und Biotechnik müssen sterilisiert oder pasteurisiert werden. Beim Sterilisieren sollten Prionen, alle lebensfähigen Formen von Mikroorganismen und alle unerwünschten Enzyme inaktiviert werden. Beim Pasteurisieren beschränkt man sich auf das Inaktivieren pathogener und der meisten übrigen Mikroorganismen. Im Folgenden werden zur Vereinfachung nur Mikroorganismen betrachtet und als Beispiel ihre Abtötung durch Hitzeeinwirkung gewählt. Die Überlegungen sind jedoch auch auf andere Inaktivierungsmethoden wie den Einsatz ionisierender Strahlen und extrem hoher Drücke übertragbar. Da es in der Praxis nicht gelingt, alle Mikroorganismen vollständig zu inaktivieren, überleben einige Keime, die ein Restrisiko bedeuten. Hinzu kommt, dass durch die Hitzeeinwirkung die Produkte geschädigt werden können, sodass ein Kompromiss zwischen Sterilität und Produktschädigung, also eine Optimierung, im Allgemeinen notwendig ist. Um das Restrisiko bzw. die gewünschte Optimierung berechnen zu können, muss der Anteil der bei bestimmten Inaktivierungsbedingungen noch überlebenden Mikroorganismen vorhergesagt werden. Zur besseren Anschauung wird von einer jeweils konstanten Inaktivierungstemperatur ausgegangen. Die Berücksichtigung einer zeit- und ortsabhängigen Temperaturverteilung im Produkt ist jedoch kein grundsätzliches Problem, der Rechenaufwand kann jedoch erheblich sein.

Nach dem *klassischen, heute üblichen* Ansatz wird die Überlebenskurve mit dem kinetischen Modell einer chemischen Reaktion 1. Ordnung beschrieben, das heißt die Änderung der Zahl N der Mikroorganismen mit der Zeit t ist proportional zu N , also $dN/dt \propto N$. Daraus folgt

$$\log S(t) = \log N(t)/N_0 = -k(T) \cdot t \quad (4)$$

Hierin bedeuten S den Überlebensanteil (survival ratio), N_0 die Zahl der Mikroorganismen zur Zeit $t = 0$ und $k(T)$ die Inaktivierungskonstante nach Arrhenius bei einer konstanten Temperatur T .

Gleichung (4) besitzt viele Vorteile, da es sich um einen selbstähnlichen, im halblogarithmischen Maßstab linearen Ansatz handelt, der sehr einfach zu handhaben und häufig brauchbar ist. So erhält man beispielsweise für die Optimierung der Qualität sterilisierter Lebensmittel eine möglichst hohe Temperatur bei möglichst kurzer Zeit.

Ein schwerwiegender Nachteil des klassischen Ansatzes ist die Tatsache, dass das Modell im Gegensatz zur chemischen Reaktionskinetik nicht auf Ursache und Wirkung beruht. Dem Modell liegt also für die Vorhersage des Überlebensanteils von Mikroorganis-

men keine Kausalität zu Grunde. Das Modell wird nur damit begründet, dass Messwerte häufig zufrieden stellend mit Gleichung (4) beschrieben werden können. Neuere Messungen bestätigen jedoch diesen experimentellen Befund in vielen Fällen nicht (Pardey, 2007).

Es ist erstaunlich, dass trotz der genannten Mängel sterilisierte Produkte weitgehend sicher sind. Dies liegt hauptsächlich daran, dass man extreme, experimentell nicht nachprüfbar Forderungen wie $S \leq -10^{-12}$ für besonders gefährliche Mikroorganismen stellt und auf Grund von langjährigen Erfahrungen und der fortlaufenden Produktprüfung Sterilisierbedingungen einhält, die eine hohe Sicherheit der Produkte wahrscheinlich machen. Der klassische Ansatz ist jedoch in vielen Fällen nicht brauchbar, um das Restrisiko abschätzen zu können. Erschwerend kommt hinzu, dass zuverlässige Messwerte im Allgemeinen nicht mehr für kleinere Überlebensanteile als -10^{-5} bis -10^{-6} möglich sind, also eine Extrapolation der ohnehin unsicheren Gleichung (4) nötig ist.

Auf die Mängel des klassischen Modells wird in der Fachliteratur seit über zehn Jahren hingewiesen. Als neues Modell wurde ein Ansatz vorgeschlagen, dem eine vitalistische Vorstellung zu Grunde liegt (vgl. Peleg & Penchina, 2000). Ausgangspunkt ist die begründbare Beobachtung, dass sich Mikroorganismen unter einem (Hitze-)Stress nicht alle gleich verhalten, sondern durch eine Verteilung individueller Eigenschaften charakterisiert werden können, die zu einer Resistenzverteilung führt. Das klassische Modell unterstellt, dass alle artgleichen Keime einer Population bei gleicher Vorgeschichte dieselbe (Hitze-)Resistenz besitzen. Einfache Messungen widerlegen die Gültigkeit dieser Annahme (Pardey, 2007).

Nach dem *vitalistischen Modell* kann man unter der Voraussetzung einer sehr großen Zahl von Mikroorganismen aus der Resistenzverteilungsdichte

$$R(t) = -dS(t)/dt \quad (5)$$

bei konstantem (Hitze-)Stress, das heißt hier bei konstanter Temperatur, direkt auf den jeweiligen Überlebensanteil $S(t) = N(t)/N_0$ der Mikroorganismen schließen. Der große Vorteil dieses Modells liegt darin, dass es auf Kausalität beruht: Ein bestimmter, zunächst als konstant angenommener (Hitze-)Stress ist die Ursache für die auf Basis der Resistenzverteilung nach Gleichung (5) berechneten Überlebenskurve. Ein weiterer Vorteil des Modells ist die Beobachtung, dass sich damit alle bisherigen Messungen gut beschreiben lassen und das klassische Modell darin als Sonderfall enthalten ist (Pardey, 2007; Peleg, 2006). Ein Beispiel zeigt Abbildung 2. Nach dem klassischen Modell müssten sich bei der gewählten halblogarithmischen Auftragung Geraden ergeben, mit denen jedoch die Messpunkte nicht sinnvoll beschrieben werden können.

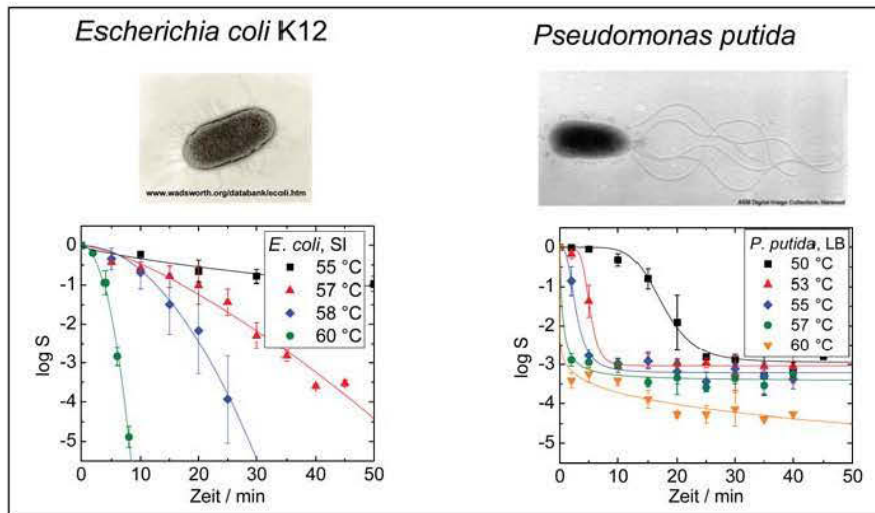


Abbildung 2

Inaktivierungsverhalten unterschiedlicher Mikroorganismen. Für *Escherichia coli* K12 ergeben sich „Schulterkurven“, bei *Pseudomonas putida* erhält man sigmoide Kurvenverläufe (Pardey, 2007)

Nachteile des vitalistischen Modells sind das nicht-lineare, im Allgemeinen auch nicht-selbstähnliche Verhalten und die Notwendigkeit, geeignete Anpassungen zur Beschreibung der Resistenzverteilungen zu entwickeln. Wie man direkt aus Gleichung (5) erkennt, kann es bei komplizierten, mehrdimensionalen Resistenzverteilungen mathematisch sehr aufwendig sein, die Überlebensrate von Mikroorganismen bei nicht konstanten Sterilisierungsbedingungen, zum Beispiel bei nicht konstanter Temperatur, zu beschreiben. Durch Rechenprogramme, die derzeit erarbeitet werden, wird dieser Nachteil zukünftig an Bedeutung verlieren. Ein weiterer Nachteil sind die erforderlichen umfangreichen, neuen Messungen zur Inaktivierungskinetik von Mikroorganismen. Schließlich ist zu erwähnen, dass das neue Modell besonders wegen des Umgangs mit mehrdimensionalen Verteilungen schwer zu vermitteln ist und bisher noch keine, beispielsweise von der FDA (U.S. Food and Drug Administration) anerkannte Methode ist.

Das Beispiel lehrt, dass Modelle ohne kausalen Hintergrund problematisch sind. Man kann damit vielleicht Messwerte anpassen und beschreiben, aber keine zuverlässigen Aussagen außerhalb des Messbereiches treffen. Es sind keine Vorhersagen möglich, die eine Extrapolation der gemessenen Kurve bei gleichzeitiger Angabe einer Genauigkeit der Vorhersage erfordert.

3.3 Funktionelle Lebensmittel

Von Funktionellen Lebensmitteln erwartet man einen gesundheitlichen Zusatznutzen, das heißt sie sollen gegen Krankheiten vorbeugen. So sollen beispielsweise

- Probiotika als lebende Mikroorganismen positiv auf die Darmflora wirken,
- Präbiotika als Ballaststoffe die Darmflora unterstützen und
- Sekundäre Pflanzenstoffe gegen Krebs, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Altersblindheit vorbeugen.

Bei den Sekundären Pflanzenstoffen stehen derzeit besonders Sterole im Blickpunkt, die durch Verringerung der Cholesterolaufnahme gegen Herz-Kreislauf-Erkrankungen vorbeugen können (statt Cholesterol war früher der Begriff Cholesterin gebräuchlich).

Es gibt viele Anhaltspunkte für den gesundheitlichen Zusatznutzen einzelner Inhaltsstoffe in Lebensmittel. Trotz vieler Studien wurde jedoch – vielleicht mit Ausnahme der Sterole – bis heute noch kein kausaler Zusammenhang zwischen einzelnen Stoffen in Funktionellen Lebensmitteln und dem gesundheitlichen Zusatznutzen zweifelsfrei nachgewiesen. Der Nachweis ist wegen des komplexen Systems und der aufwendigen Untersuchungen schwierig. Im Hinblick auf Humanstudien sind Einschränkungen zu beachten; für epidemiologische Studien ist ein hoher Zeitaufwand nötig. Hinzu kommt, dass man mit verfahrenstechnischen Methoden erst kürzlich die in Frage kommenden Sekundären Pflanzenstoffe, die meist schlecht bioverfügbar sind, in eine vom Menschen aufnehmbare Form überführen kann (Ax, 2004; Engel und Schubert, 2006). Erst mit Inhaltsstoffen, die auf reproduzierbare Weise in eine bioverfügbare Form gebracht wurden, sind zielführende Studien möglich.

Auch ohne Nachweis eines gesundheitlichen Nutzens, also ohne ausreichende Kenntnis von Ursache und Wirkung, werden Funktionelle Lebensmittel bzw. Nahrungs-Ergänzungsmittel zunehmend nachgefragt und sind offensichtlich ein gutes Geschäft.

3.5 Erwärmung von Lebensmitteln mit Mikrowellen

Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen mit einer Frequenz von 300 MHz bis 300 GHz. Ihre Leistung dissipiert in dielektrischen Stoffen wie Lebensmitteln und führt daher zu einer schnellen Erwärmung im Innern, da der bei konventioneller Erhitzung zeitaufwendige Wärmetransport von außen nach innen weitgehend entfällt. Haushaltsübliche Mikrowellenöfen, die inzwischen weit verbreitet sind, arbeiten mit einer Frequenz von 2,45 GHz. Ziel der Mikrowellenerwärmung ist die möglichst gleichförmige Erwärmung des Lebensmittels. Ideal wäre eine örtlich konstante Temperatur während der gesamten Erwärmung. In der Praxis ist man heute weit von diesem Ideal entfernt. Auf Grund von inhomogenen

elektrischen Feldern im Innern der zu erheizenden Lebensmittel und wegen ihrer örtlich unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften stellen sich lokal unterschiedliche Temperaturen ein. Zu hohe örtliche Temperaturen (hot spots) schädigen das Lebensmittel, zu niedrige Temperaturen (cold spots) führen zu nicht ausreichenden Bedingungen für das Inaktivieren von Mikroorganismen. Örtlich unterschiedliche Temperaturen im Lebensmittel verursachen einen meist unerwünschten Stofftransport. Für die Entwicklung mikrowellengeeigneter Lebensmittel bzw. Fertiggerichte, für die mögliche Regelung eines Mikrowellenofens und für die industrielle Anwendung von Mikrowellen zum Pasteurisieren und Sterilisieren ist die Kenntnis der örtlichen und zeitlichen Temperaturverteilung im Innern der Produkte erforderlich (vgl. Schubert & Regier, 2005). Im Folgenden wird unter dem Blickwinkel der Kausalität dargestellt, wie diese Temperaturverteilung während einer Mikrowellen-Behandlung vorhergesagt werden kann. Einzelheiten enthält eine Dissertation (Knörzer, 2006).

Es besteht eine Kausalität zwischen einem äußeren Mikrowellenfeld und der im Innern eines beliebigen Dielektrikums dissipierten, örtlichen und zeitlichen Leistungsdichteverteilung P_v . Mit Hilfe der Maxwell'schen Gleichungen und von drei Materialgleichungen kann dieser Zusammenhang exakt beschrieben werden, da es sich um ein lineares System handelt. Lediglich bei extrem hohen elektrischen Feldern, die jedoch für die vorliegende Fragestellung nicht relevant sind, müssen bei den Materialgleichungen Nichtlinearitäten berücksichtigt werden, die letztlich Näherungslösungen erfordern. Für die exakte Berechnung der Leistungsdichteverteilung kann auf kommerzielle Rechenprogramme zurückgegriffen werden; bei kompliziert zusammengesetzten Lebensmitteln sind leistungsstarke Rechner erforderlich.

Durch Kopplung von Elektromagnetismus mit bewährten Modellen des Wärme- und Stofftransports kann die örtliche und zeitliche Temperaturverteilung im Lebensmittel mittels Simulation berechnet werden (Knörzer, Regier & Schubert, 2005a). Die Modelle liefern zwar keine exakten Lösungen, sie sind jedoch langjährig erprobt, vielfach geprüft und gehören zu den etablierten Grundoperationen der Verfahrenstechnik. Für die vorliegende Fragestellung sind die Näherungen völlig ausreichend. Als Ergebnis der Simulation erhält man die örtliche und zeitliche Verteilung der Temperatur im Innern eines beliebig geformten und beliebig großen Lebensmittels, das abhängig vom Ort unterschiedlich zusammengesetzt sein darf, im Verlauf der Mikrowellen-Erwärmung. Für die Simulationsrechnungen, die je nach der örtlichen Zusammensetzung des Lebensmittels eine ausreichende Rechnerkapazität erfordern, ist natürlich die Kenntnis der Stoffdaten in Abhängigkeit von der Temperatur nötig.

Zur Validierung der Simulationsrechnungen wurde die Methode der magnetischen Kernspinresonanz (NMR) benutzt, die heute meist als Magnetresonanz (MR) bezeichnet wird. Vereinfacht dargestellt beruht die Methode auf der Auswertung von NMR-Spektren, aus denen über Kernspindichten die Konzentration einzelner Bestandteile, beispielsweise Wasser, ermittelt werden kann. Als ortsauflösende, bildgebende Magnetresonanz (MRI) ist diese Messmethode hauptsächlich aus der Medizin bekannt; MRI-Tomographen liefern zwei- oder dreidimensionale Bilder über den inneren Aufbau des menschlichen Körpers. Mittels MRI kann auch die Temperaturverteilung im Innern von Körpern ortsaufgelöst gemessen werden. Die Messmethode basiert auf der Temperaturabhängigkeit der chemischen Verschiebung (chemical shift) der Wasserprotonenresonanz. Wie stets bei MRI handelt es sich um eine nicht-invasive Messmethode. Um ortsaufgelöst die Verteilung von Zusammensetzung und Temperatur messen zu können, wurde die Probe in einen MRI-Tomographen eingebracht. Zur Inline-Messung der Temperaturverteilung während der Mikrowellenbehandlung wurde eine spezielle Anordnung entwickelt, mit der Mikrowellen in den Messraum des Tomographen eingekoppelt werden können (Knörzer, Regier & Schubert, 2005b). Der Vergleich zwischen Simulationsrechnung und der mittels MRI gemessenen, orts- und zeitaufgelösten Temperaturverteilung im Innern eines zylindrischen, homogenen Modelllebensmittels während der Mikrowelleneinwirkung liefert eine gute Übereinstimmung (Abb. 3). Inline-Temperaturmessungen bei Lebensmitteln (z. B. Hähnchenflügel), deren ortsaufgelöste Zusammensetzung mittels MRI vereinfacht als Knochen, Fett- und Muskelgewebe erfasst und für die Simulation berücksichtigt wurde, zeigen ebenfalls die Brauchbarkeit der Berechnungen (Knörzer, 2006).

Das Beispiel zeigt, dass man heute mit Hilfe leistungsstarker Rechner Vorgänge, die sich kausal beschreiben lassen, zuverlässig ermitteln kann. Im vorliegenden Fall konnte die im Produkt dissipierte Leistungsdichte infolge eines äußeren Mikrowellenfeldes exakt berechnet werden. Noch vor wenigen Jahren mussten hierzu stark vereinfachende Modelle herangezogen werden, die nur ungenaue Ergebnisse liefern konnten. Durch Kopplung der exakten Berechnungen mit bewährten Modellen des Wärme- und Stofftransports wurde die Temperaturverteilung in Lebensmitteln orts- und zeitaufgelöst zuverlässig vorhergesagt, wie Inline-Messungen belegen, die erst seit kurzem vorliegen (Knörzer, 2006). Die größte Unsicherheit resultiert aus der Ungenauigkeit der Stoffdaten, wie Abschätzungen zeigen.

Es sei darauf hingewiesen, dass die hier genannten Methoden auch auf andere Anwendungen in der Verfahrenstechnik übertragen werden können. Die kontrollierte örtliche Erwärmung durch Mikrowellen in der Krebstherapie (Hyperthermie) ist ein wichtiges Anwen-

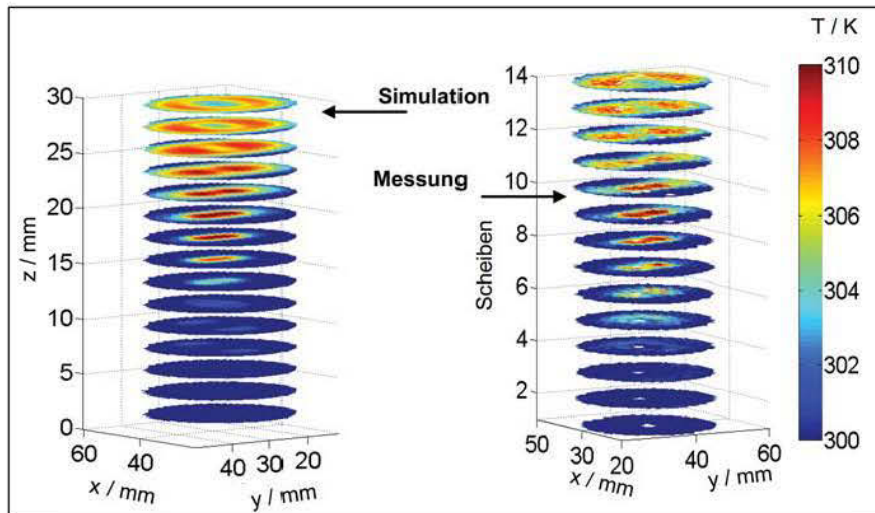


Abbildung 3
Vergleich zwischen Simulation und mittels MRI gemessener Temperaturverteilung
am Beispiel eines zylindrischen Modelllebensmittels (Knörzer, 2006)

dungsgebiet, das intensiv bearbeitet wurde (vgl. Nadobny et al., 1996; Kowalski, 2004). In der Hyperthermie sind jedoch noch andere Bedingungen zu beachten, sodass eine einfache wechselseitige Übertragung mit der hier diskutierten Methode problematisch ist.

Fortgeschrittene Rechenmethoden, leistungsstarke Rechner und neue Messmethoden sind hier wie in vielen anderen Fällen der Verfahrenstechnik der Schlüssel zum Erfolg. Grundlage ist jedoch die Kausalität, die erkannt und wenn möglich zur exakten Berechnung genutzt werden sollte. Ist eine exakte Berechnung (noch) nicht möglich, so können Modelle zuverlässige Ergebnisse liefern, sofern sie geprüft wurden, sich bewährt haben und möglichst einen kausalen Hintergrund besitzen.

4 Sicherheit und Risiken, dargestellt am Beispiel von Lebensmitteln

Wie die Beispiele belegen, sollte die Kausalität des grundlegenden Zusammenhangs für zuverlässige Vorhersagen und für die Abschätzung eines Risikos bekannt sein. Kann ein Zusammenhang kausal beschrieben werden, so sind heute durch fortgeschrittene Rechenmethoden und leistungsstarke Rechner exakte Berechnungen möglich und frühere Vereinfachungen zu ersetzen. Die hohe Komplexität in der Verfahrenstechnik erfordert

jedoch auch weiterhin Modelle zur vereinfachten Beschreibung von Prozessen. Durch Rechnereinsatz und Simulation werden die Modelle aufwendiger und genauer sowie durch Validierung mittels moderner Messtechnik und Erfahrung fortlaufend verbessert.

Dennoch verbleibt wegen fehlender oder nicht quantitativ beschreibbarer Kausalität ein Restrisiko, das jedoch wegen verbesserter Verfahren ständig geringer wird und einen wesentlichen Teil des technischen Fortschritts ausmacht. So sind industriell verarbeitete Lebensmittel so sicher wie nie zuvor, auch wenn manche Verbraucher anderer Meinung sind.

Ein Beispiel ist das Pasteurisieren von Milch, die früher wegen pathogener Keime Ursache für viele Krankheiten mit hoher Sterblichkeit war. Pasteurisierte Milch besitzt heute ein extrem geringes gesundheitliches Risiko. Von „naturbelassener“, also nicht pasteurisierter Milch, die in manchen Ländern angeboten wird und keinen strengen Kontrollen unterliegt, geht dagegen ein vergleichsweise hohes Risiko aus, da krankheitserregende Mikroorganismen nicht inaktiviert wurden.

Verbraucher schätzen das Restrisiko vielfach falsch ein und richten sich nach dem vermeintlichen („gefühlten“) Risiko. Tabelle 1 stellt das tatsächliche Risiko dem vermeintlichen Risiko von Lebensmitteln gegenüber. Das tatsächliche Risiko wird als Todesfälle pro Jahr in Deutschland infolge des Verzehrs von Lebensmitteln angegeben. Für das vermeintliche Risiko ist nur ein qualitatives Maß vermerkt, das aus Sicht der öffentlichen Meinung in Deutschland geschätzt wurde. Man erkennt, dass zwischen dem tatsächlichen und dem vermeintlichen Risiko offensichtlich keine Kausalität besteht. „Naturbelassene“, also nicht oder wenig verarbeitete Lebensmittel stehen bei vielen Verbrauchern im hohen Ansehen, auch wenn das Risiko im Vergleich zu industriell verarbeiteten Lebensmitteln infolge pathogener Mikroorganismen und natürlicher Gifte (Tab. 1) groß ist. Die Einschätzung von Restrisiken durch Nichtfachleute wird durch unzureichendes Wissen, unseriöse Berichterstattung und die damit verbundene Verunsicherung beeinflusst. Es ist eine dankenswerte Aufgabe der Wissenschaft und ihrer Akademien, Wissen den Verantwortlichen, den Meinungsmachern und der Öffentlichkeit verständlich zu vermitteln. Dazu gehört die Information, dass es wegen fehlender oder nicht beschreibbarer Kausalität keine Technik ohne ein Restrisiko gibt, das abgeschätzt und offen gelegt werden sollte. Aussagen wie „verarbeitete Lebensmittel sind absolut sicher“, die letztlich vom Gesetzgeber verlangt werden, da unsichere Lebensmittel nicht vermarktet werden dürfen, verringern die Glaubwürdigkeit der Verfasser und sind nicht hilfreich, die Einschätzung von Restrisiken durch Nichtfachleute zu verbessern.

Tote pro Jahr in Deutschland	Ursache	Risiko aus Sicht der öffentlichen Meinung
200.000 bis 400.000	falsche Ernährung (zu fett, zu viel; einseitig)	mittel
mehr als 50.000	Alkohol (Ethanol)	mittel
200-300	Mikroorganismen, z. B. Salmonellen, EHEC, Aspergillus flavus (Aflatoxin), Cl. Botulinum,>Listerien	gering
10-100	Natürliche Gifte (Blausäure, Hämagglutinine, Solanine,...)	sehr gering
?	Acrylamid in Lebensmitteln	sehr hoch
0	BSE	sehr hoch
nicht nachgewiesen	Umweltkontaminanten	hoch
0	Zusatzstoffe	hoch
0 (weltweit)	gentechnisch veränderte Lebensmittel	sehr hoch
0	Bestrahlung (ionisierende Strahlen)	sehr hoch
0	Mikrowellen	mittel bis hoch
0	UHT-Erhitzung	mittel
?	neue Verfahren (Hochdruck, Elektropuls,...)	?

Tabelle 1
Tatsächliche und vermeintliche Risiken von Lebensmitteln

Literatur

- [1] Ax, K.: Emulsionen und Liposomen als Trägersysteme für Carotinoide. Diss. Universität Karlsruhe, 2003; Aachen: Shaker Verlag, 2004.
- [2] Engel, R. & H. Schubert: Formulation of phytosterols in emulsions for increased dose response in functional foods. In: Innovative Food Science and Emerging Technologies 6 (2005), S. 233–237.
- [3] Karbstein, H.: Untersuchungen zum Herstellen und Stabilisieren von Öl-in-Wasser-Emulsionen. Diss. Universität Karlsruhe, 1994.
- [4] Kempa, L., Schuchmann, H. P. & H. Schubert: Tropfenzerkleinerung und Tropfenkoaleszenz beim mechanischen Emulgieren mit Hochdruckhomogenisatoren. In: Chemie Ingenieur Technik 78 (2006) 6, S. 765–768.
- [5] Knörzer, K.: Simulation von Mikrowellenprozessen und Validierung mittels bildgebender magnetischer Resonanz. Diss. Universität Karlsruhe, 2006; Aachen: Shaker Verlag, 2006.

- [6] Knörzer, K., M. Regier & H. Schubert: Simulation of microwave heating processes. In: [15], 2005a.
- [7] Knörzer, K., M. Regier & H. Schubert: Measuring temperature distributions during microwave processing. In: [15], 2005b.
- [8] Nadobny, J., Wust, P., Seebass, M., Deuffhard, P. & R. Felix: A volume-surface integral method for solving Maxwell's equations in electrically inhomogeneous media using tetrahedral grids. In: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 44 (1996) 4, S. 543–554.
- [9] Pardey, K.: Prinzipien der Inaktivierung von vegetativen Mikroorganismen auf der Basis von Resistenzverteilungen und unter Berücksichtigung ihrer Vorgeschichte. Diss. Universität Karlsruhe, 2007; Aachen: Shaker Verlag, 2007.
- [10] Peleg, M.: Advanced quantitative microbiology for foods and biosystems, Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2006.
- [11] Peleg, M. & C. M. Penchina: Modeling microbial survival during exposure to a lethal agent with varying intensity. In: Critical Reviews in Food Science and Nutrition 40 (2000) 2, S. 159–172.
- [12] Kowalski, M. E.: Model-based optimization of phased arrays for electromagnetic hyperthermia. In: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 52 (2004) 8, S. 1964–1977.
- [13] Schönert, K.: Zerkleinern. In: Bohnet, M. (Hg.), Mechanische Verfahrenstechnik, Weinheim: Wiley-VCH, 2004.
- [14] Schubert, H. (Hg.): Emulgiertechnik, Hamburg: Behr's Verlag, 2005.
- [15] Schubert, H. & M. Regier (Hg.): The microwave processing of foods, Cambridge/England: Woodhead Publishing Ltd., 2005.
- [16] Stang, M.: Zerkleinern und Stabilisieren von Tropfen beim mechanischen Emulgieren. Diss. Universität Karlsruhe, 1998; Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998.

Fritz Klocke

Kausalität in der Produktionswissenschaft

Produktionswissenschaft und Produktionstechnik

Die *Produktionswissenschaft* ist eine erkenntnisorientierte Wissenschaft mit Anwendungsbezug. Sie stellt die wissenschaftlichen Methoden, Modelle und Systematiken für die Produktionstechnik zur Verfügung. Die Produktionswissenschaft erforscht und entwickelt nachprüfbar Vorgehensweisen zur Erzeugung neuen Wissens für die Produktionstechnik.

Die *Produktionstechnik* befasst sich mit der nachhaltigen industriellen Herstellung von materiellen und immateriellen Gütern im Lebenszyklus für einen internationalen Markt. Dies umfasst die Maschinen, Verfahren und Prozesse, Produkte, Fabriken, Menschen, die Organisation und die Logistik zum Herstellen von Gütern.

Aus diesen Definitionen leitet sich für die Produktionswissenschaft eine *wissenschaftliche, technische, wirtschaftliche und eine soziale Verantwortung* ab.

Die Produktionswissenschaften gehören zu den Ingenieurwissenschaften. In der Produktionswissenschaft arbeiten unterschiedliche Fachdisziplinen anwendungsorientiert zusammen. Beispielhaft seien Ingenieure, Physiker, Mathematiker, Informatiker, Biologen, Mediziner und Arbeitswissenschaftler genannt. Jede Wissenschaftsdisziplin hat aus dem eigenen Wissenschaftsverständnis auch eigene Abstraktionen, Interpretationen und Anwendungen des Kausalitätsbegriffs entwickelt. Dies ist der Grund, weshalb die Diskussion um eine inhaltlich gemeinschaftlich getragene Definition zur Kausalität in der Produktionswissenschaft noch nicht abgeschlossen ist.

Der folgende Beitrag soll diesen Meinungsbildungsprozess beleuchten und reflektieren, gleichzeitig aber auch zur Diskussion anregen.

Im Zusammenhang mit der Anwendung des Kausalitätsbegriffs mögen zwei Punkte wichtig sein, die sich aus dem Selbstverständnis der Produktionswissenschaft ableiten lassen:

- a) Die Produktionswissenschaft erhebt **nicht** den Anspruch, eine **exakte Wissenschaft** zu sein.
- b) Im Zentrum der wissenschaftlichen Arbeiten steht die Erforschung und Entwicklung von praktikablen Verfahren (zielorientiert, rationell und effizient), um technische, organi-

satorische und logistische Vorgänge zu konfigurieren, in ihrer Wirkung zu verstehen und allgemeingültig zu modellieren.

Der unter a) genannte Punkt des Selbstverständnisses ist für eine Kausalitätsdiskussion von besonderer Bedeutung. Unter Exaktheit soll in diesem Zusammenhang verstanden werden, dass eine **strenge Kausalität** zwischen Ursachen und Wirkungen vorliegt. Strenge Kausalität bedeutet dann, dass bei Kenntnis aller Ursachen auch alle Wirkungen eindeutig bestimmbar sind und umgekehrt. In diesem strengen Sinne kann, wahrscheinlich darf, die Produktionswissenschaft gar nicht den Anspruch erheben, exakt zu sein. Die Produktionstechnik befasst sich mit technischen Systemen, der Funktionalität technischer Systeme und dem wirtschaftlichen Betrieb technischer Systeme. Das Entscheidende ist, dass Funktionskenngrößen und Bewertungskenngrößen technischer Systeme immer mit Toleranzen versehen sind. Als Toleranz versteht man in der Produktionswissenschaft einen **Unschärfbereich**, in dem vorgegebene Eigenschaftsmerkmale oder Zielgrößen schwanken dürfen, manchmal sogar schwanken müssen. Dieses können zum Beispiel Geometrie-kenngrößen an einer technischen Komponente sein, Eigenschaftswerte von Werkstoffen oder auch wirtschaftliche Kenngrößen, wie Kosten oder Durchlaufzeiten. Keine Zielkenngröße eines technischen Systems kann ohne Toleranzen (Schwankungsbreiten) erzeugt bzw. bestimmt werden (philosophisch: absolute Genauigkeit). Andererseits sind in vielen Fällen Toleranzen unbedingt notwendig, um eine bestimmte Funktionalität zu gewährleisten. Hier geht es nicht um die Frage, dass Toleranzen nicht vermeidbar sind, sondern dass bestimmte Schwankungsbreiten vorgegeben werden und sicher einzuhalten sind. Ein weiterer Punkt, der im engen Zusammenhang mit Toleranzen steht, ist die Wirtschaftlichkeit. Die Produktionswissenschaft stellt praktikable, rationelle und effiziente Verfahren für die Produktionstechnik zur Verfügung. Ein alter Konstruktionsgrundsatz sagt: konstruiere und fertige nicht so genau wie möglich, sondern so genau wie nötig. Hier wird der Zusammenhang zwischen Toleranzen und Herstellkosten angesprochen. Diese wenigen Beispiele mögen zeigen, dass das Arbeiten und die Berücksichtigung von **Toleranzen ein inhärenter Bestandteil der Produktionstechnik** sind. Die Produktionswissenschaft lebt also nicht nur mit der physikalisch vorgegebenen Randbedingung, dass absolute Genauigkeit nicht möglich ist, sondern sie muss auch berücksichtigen, dass Schwankungsbreiten zuweilen zwingend notwendig sind. Damit wird deutlich, dass eine strenge Kausalität, bei der ein eineindeutiger Zusammenhang zwischen Ursachen und Wirkungen vorausgesetzt wird, in der Produktionswissenschaft nicht vorausgesetzt werden darf. In diesem Zusammenhang muss das unter a) gemachte Postulat interpretiert werden, vielleicht sogar dahingehend geschärft werden, dass die Produktionswissenschaft gar nicht den Anspruch

erheben *darf*, exakt zu sein. Kausalitätsbeziehungen und Kausalitätsinterpretationen werden in der Produktionswissenschaft immer nur im eingeschränkten Sinne möglich sein. Dies soll im Folgenden an einigen Beispielszenarien näher erläutert werden.

Wertschöpfungskette

Die folgenden Abbildungen 1 bis 3 zeigen die grundsätzlichen Arbeitsschritte beim Entstehen eines Produktes/technischen Systems (von der Idee bis zum Produkt). In Abbildung 1 entwickelt sich die Wertschöpfungskette sequentiell. Der Konkretisierungsgrad nimmt auf der Y-Achse von oben nach unten zu, auf der X-Achse ist beispielhaft als Zielgröße die Zeit dargestellt. Die Anordnung der Arbeitsblöcke lässt eine **kausale Ordnung** erkennen. Die Ausgangskenngrößen eines Blockes sind offensichtlich notwendig, um im folgenden Block als Eingangsgrößen die Wertschöpfung weiterzuentwickeln. Über diese eindeutigen kausalen Zusammenhänge wird offensichtlich die Zeit (z. B. die Durchlaufzeit, die Lieferzeit) determiniert. In diesem Ablaufmodell sind die angewandten Zeitmodelle im Allgemeinen auf den Regeln der klassischen Logik aufgebaut (wenn → dann).

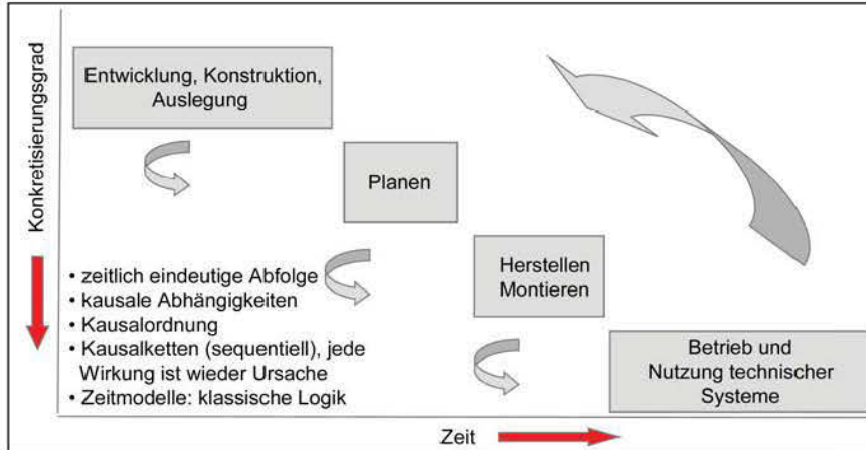


Abbildung 1
Sequentielle Wertschöpfung

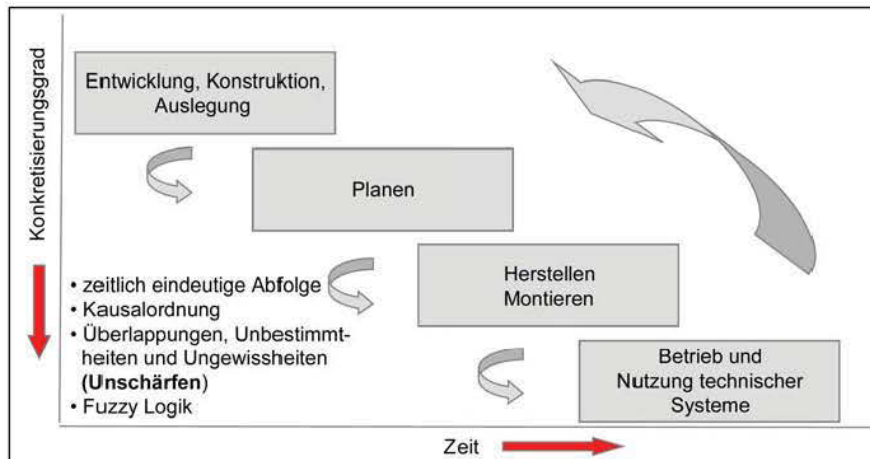


Abbildung 2
Parallele Wertschöpfung

Unter dem Zwang zur Verkürzung von Durchlaufzeiten und Lieferzeiten entwickelten sich im Laufe der Jahre neue Organisationsformen zum Aufbau und zur Gestaltung von Wertschöpfungsketten. Abbildung 2 zeigt Organisationsmodelle, die unter den Begriffen Simultaneous Engineering und/oder Concurrent Engineering zusammengefasst sind. Offensichtlich ist, dass in der zeitlichen Abfolge der Blöcke gewollte Überschneidungen eingebaut sind. So könnte beispielsweise bereits mit der Planung und Auswahl von Fertigungsverfahren begonnen werden, obwohl die Detaillierung und Auslegung der Komponenten eines technischen Systems in der Konstruktion noch nicht vollständig abgeschlossen ist. Die Zielgröße auf der X-Achse ist wiederum die Zeit. Andere Zielgrößen könnten in ähnlicher Form bewertet werden. Jetzt können die Zielgrößen nicht mehr mit eindeutigen logischen Verknüpfungen bestimmt werden. Die Zielgrößen sind unscharf. Modell- und Berechnungsmethodiken basieren deshalb in diesen Fällen häufig auf **unscharfer Logik**. Der Konkretisierungsgrad steigt auch hier auf der y-Achse von oben nach unten, allerdings ist auch hier nun ein Unschärfebereich erkennbar. Entscheidend ist, dass sich auch in dieser Organisation trotz vorhandener Unschärfen in der Konkretisierung und in der Zielerfüllung kausale Abhängigkeiten mit rationalen (logischen) Entscheidungsmodellen darstellen lassen.

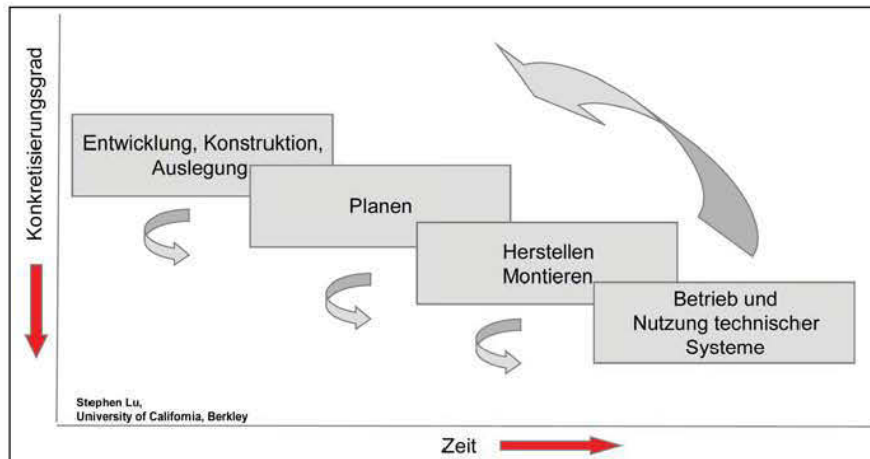


Abbildung 3
Engineering Collaboration
Acc. to Stephen Lu, University of California, Berkeley

Ein drittes, in neuerer Zeit diskutiertes Modell zur Organisation von Wertschöpfungsketten ist unter dem Begriff Collaborative Engineering bekannt geworden (ECN = Engineering Collaboration via Negotiation, Abb. 3). ECN ist entwickelt worden als eine neue Wissenschaftsplattform für teamorientiertes Forschen und Entwickeln in der Produktionswissenschaft. Eine kausale Ordnung in der Wertschöpfungskette ist auch hier erkennbar, Konkretisierungsfortschritt und Zielerreichung werden nun aber neben **rationalen** auch durch **emotionale** Faktoren bestimmt.

Komponentenherstellung

Im Folgenden soll das Herstellen von technischen Komponenten etwas näher in der Tiefe beleuchtet werden. Bei der Fertigung steht die Wandlung eines Rohteils zum Fertigteil im Fokus. Eine grundsätzliche Parallele hierzu findet sich in der Philosophie des Altertums und in der Ontologie. Aristoteles unterscheidet vier Fälle, die im Prinzip auch auf den Herstellprozess technischer Produkte angewandt werden können (Abb. 4). Die übergeordneten Kausalitätsbezüge sind heute offensichtlich die gleichen wie vor einigen tausend Jahren.

- **Causa Materialis:** Rohmaterial
(*Sein eines Gegenstandes, Ursprung*)
- **Causa Formalis:** Design, Kreativität, Konstruktion
(*Künstler*)
- **Causa Efficiens:** Herstellen des Gegenstandes (*Werden*)
- **Causa Finalis:** Nutzung (*Zweckbestimmung*)

Abbildung 4
Kausalitäten (n. Aristoteles)

Bei einer detaillierten Betrachtung des Formgebungsprozesses werden weitere Kausalitätsbezüge offensichtlich. Zur Überführung eines Rohmaterials in eine Fertigungskomponente muss Energie (Transformationsenergie) aufgewendet werden. Und unabhängig vom angewandten Fertigungsprinzip fließt ein Teil der aufgewandten Transformationsenergie immer in das Werkstück (Fertigteil) und verändert den Energieinhalt des Bauteils (Eigenspannungen, Phasenumwandlungen, Korngrößen). Mit der Änderung des Energieinhaltes ändern sich allerdings auch die Eigenschaften des Bauteils. Häufig sind die Auswirkungen quantitativ nicht bekannt. Die Folge ist, dass Eigenschaftsschwankungen auftreten. Ob die Eigenschaftsschwankungen technisch relevant sind, hängt von einer Einzelfallbetrachtung ab. Entscheidend ist, dass sie immer auftreten und zu **Unschärfen** führen. Bei nachfolgenden Fertigungsschritten können sie durch Überlagerung verstärkt oder geschwächt werden. Ganz vermeiden sind sie nicht. Dieser Prozess der wechselseitigen Einflussnahme von Fertigungsprozessen auf den Energieinhalt der gefertigten Komponente wird in der Fertigungstechnik auch als **Fertigungshistorie** bezeichnet. Zum Teil sind die Auswirkungen der Fertigungshistorie auf Zielgrößen bekannt, sie können dann in deterministischen Modellen berücksichtigt werden. Zum Teil treten sie aber auch zufällig auf und können dann in ihrer Wirkung allenfalls in probabilistischen Modellen berücksichtigt werden. Das Arbeitsergebnis (Erreichen der Zielgrößen) wird **unsicher**. Neben den Einflüssen der Fertigungshistorie auf Eigenschaftsschwankungen werden an einer Getriebewelle auch ganz bewusst Toleranzen für geometrische Formelemente vorgegeben, zum Beispiel Toleranzen an Lagersitzung zu Einstellung funktionell vorgegebener Spiele/Übermaße beim Paaren mit einem Gegenkörper. Ein Beispiel hierzu ist in Abbildung 5 dargestellt.

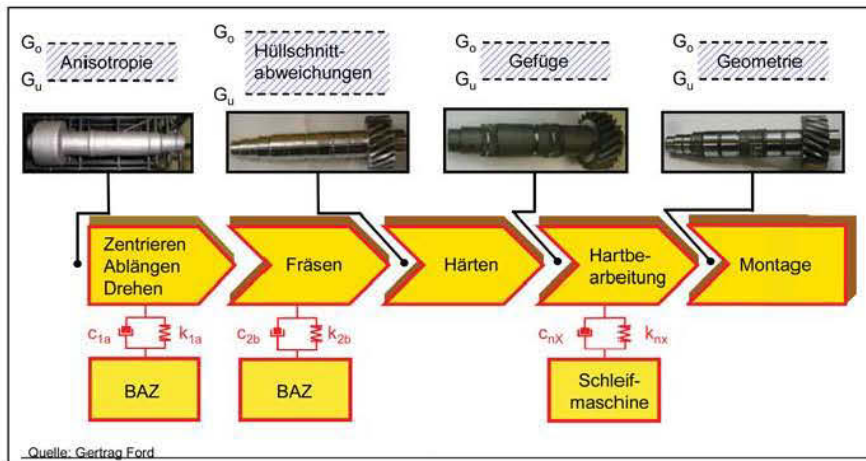


Abbildung 5
Getriebewelle

Es zeigt das Entstehen einer Getriebewelle mit ausgewählten Fertigungsverfahren. Ausgehend von einem vorgeschmiedeten Rohling entsteht in verschiedenen Fertigungsschritten eine einbaufertige Getriebewelle. Die kausalen Abhängigkeiten zwischen Ursachen und Wirkungen in den einzelnen Arbeitsschritten sind offensichtlich, die **Kausalordnung** ist eindeutig, die Vorhersage der Ergebniskenngrößen bzw. Zielgrößen ist aber auch hier nur mit Toleranzbändern (*Unschärfbereich*) möglich. Auch hier wird die Zeit über den Konkretisierungsgrad bestimmt. Der Fertigungsfortschritt ist zeitlich geordnet, und der **Kausalitätsbegriff** kann in Übereinstimmung mit der Interpretation vieler naturwissenschaftlicher Bereiche in seiner **ingeschränkten Form** ohne Widerspruch angewendet werden.


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 Zielgrößen sicher erreicht werden können. Wir postulieren **Kausalitätserwartungen**. Wenn unsere Erwartungen nicht eintreffen, waren offensichtlich die angenommenen Kausalitätsbeziehungen mindestens teilweise nicht zutreffend. Abbildung 6 zeigt ein Ergebnis, in dem eine technische Komponente entgegen aller Erwartungen frühzeitig versagte, obwohl, wie in den Ingenieurwissenschaften üblich, mit Versagenswahrscheinlichkeiten gerechnet wurde. In diesem Fall waren die kausalen Abhängigkeiten zwischen Ursachen und Wirkungen nicht ausreichend bekannt. Der Bruch eines Bohrers hat im gezeigten Fall nicht bekannte Mikrorisse in der

Oberfläche erzeugt, die zum vorzeitigen Ausfall der Komponente führten. Dieses Beispiel zeigt die hohe Komplexität und steht für die Vielzahl der in Wechselwirkung stehenden Parameter.

Eine wichtige Forschungsfrage der Produktionswissenschaft in der Modellierung von Fertigungshistorien ist, die kausalen Abhängigkeiten sorgfältig zu erforschen, sie zu modellieren und sie in ihrer Wirkung zu beschreiben und die Zusammenhänge allgemein gültig darzustellen. Häufig wird dabei in vorwärts gerichteten Kausalketten (Rohteil zum Fertigteil) in der Modellierung allgemein folgender Zusammenhang formuliert: das Ergebnis eines Fertigungsschrittes $y(t)$ ist kausal von x (der Ursache) abhängig, wenn bei einer gegebenen Informationsmenge zum Zeitpunkt $(t-1)$ zum Zeitpunkt t das Ergebnis (y) besser prognostiziert werden kann, als ohne Berücksichtigung von x (Ursache). Der zuvor genannte Modellierungsansatz kann auch in einer rückwärts gerichteten Kausalkette Anwendung finden, wenn es darum geht, von bekannten Ursachen (z. B. Schäden) auf Wirkungen zu schließen. Hier formulieren wir im Allgemeinen folgendermaßen: ein bestimmtes Ergebnis $y(t)$ kann zum Zeitpunkt t (Betriebszeitpunkt) dann sicher angenommen werden, wenn zum Zeitpunkt $(t-1)$ alle herstellbezogenen Informationen bekannt sind, die kausal mit dem Ergebnis zusammenhängen.

ACCIDENT
DL 1288, July 6, 1996 - Pensacola, Florida

- MD-88 engine failure on take-off roll
- Pilot aborted take-off
- Stage 1 Fan Disk separated: impacted cabin
- Life Limit: 20,000 cycles. Failure: 13,835 cycles
- **Poorly machined Failure from bolt hole**
- 2 fatalities
- NTSB Report recommended ...
 - Changes in inspection methods, shop practices
 - Fracture mechanics based damage tolerance



Enhanced In-Service Inspection and Robust Manufacturing Initiatives

Abbildung 6
Läuferscheibe

Komplexität

Sowohl bei der gesamtheitlichen Betrachtung von Wertschöpfungsketten als auch bei der Herstellung von einzelnen Komponenten liegt eine hohe Komplexität in den zu modellierenden Systemen vor. Dies wird durch Forderungen des Marktes nach variantenreicher Fertigung bei kleinen Losgrößen, hoher Zuverlässigkeit und niedrigen Kosten sowie durch kurze Lieferzeiten weiter verschärft. Die Grenzen des technisch und wirtschaftlich Machbaren werden immer wieder neu hinterfragt. Die Leistungsanforderungen an Fertigungseinrichtungen (Werkzeugmaschinen und Werkzeuge), die Komplexität der Gesamtsysteme und auch die Komplexität der Organisation und Informationsflüsse in der Fabrik führen häufig bereits bei kleinsten Änderungen zu nicht kontrollierbaren bzw. nicht erwarteten Auswirkungen. Um in Abhängigkeit vom Komplexitätsgrad Systeme in Modellen möglichst realitätsnah abzubilden, werden in der Produktionswissenschaft neben den zuvor genannten Ansätzen auch nichtlinear-dynamische Modellierungen eingesetzt. Hier geht es im Wesentlichen darum, im Experiment und in der Realität beobachtete Phänomene in möglichst realitätsnahen Modellen abzubilden, um entweder Sensitivitätsanalysen über starke und schwache Kausalitätsabhängigkeiten zwischen einzelnen Einflussgrößen zu erforschen oder auch das Modellverhalten unter gegebenen Randbedingungen möglichst realitätsnah zu prognostizieren.

Zusammenfassung

Die Produktionswissenschaft/Produktionstechnik ist anwendungsorientiert. Sie überträgt naturwissenschaftliche Grunderkenntnisse auf praktisch nutzbare Lösungen, dies erfolgt zielorientiert. Die Ergebnisgrößen (Kausalitätserwartung) sind auf der höchsten Aggregationsebene

- die sichere Funktionalität des technischen Systems,
- die Kosten,
- die Durchlaufzeit und
- die Effizienz.

Die zuvor genannten Beispiele haben gezeigt, dass in der Produktionswissenschaft Kausalitätsdefinitionen nur im eingeschränkten Sinne verwendet werden. Produktionstechnische Anwendungen sind nicht streng determinierbar. Deshalb sind Beispiele für Kausalitätsdefinitionen für die Produktionswissenschaft auch nicht im Determinismus

(Descartes) zu finden. Produktionswissenschaft beinhaltet im Selbstverständnis bereits die Akzeptanz von gewissen Unschärfen, von Unsicherheiten und Toleranzen. Auf der anderen Seite ist aber auch der absolute Zufall (Kopenhagener Modell) kein Gedankenmodell für die Produktionswissenschaft, das zur Definition von Kausalitätsbezügen dienen könnte. In der Produktionswissenschaft muss der Kausalitätsbegriff sowohl physikalische Grenzen, technische Forderungen und wirtschaftliche Bezugsgrößen zusammenführen. Strenge Kausalitäten werden in der Produktionswissenschaft nicht unterstellt. Dennoch scheint auch der Begriff der eingeschränkten Kausalität für die Produktionswissenschaft nicht ausreichend zu sein. Er lässt zwar mit vielen Bereichen der Naturwissenschaft Gemeinsamkeiten erkennen und ist damit eine gute Basis zur allgemein gültigen Akzeptanz, dennoch stehen in der Produktionswissenschaft und in der Produktionstechnik neben der Funktionalität immer auch die Wirtschaftlichkeit und die praktische Nutzenanwendung des Erzeugten gleichbedeutend auf einer Stufe. Um auch diese Facette in Kausalitätsbezügen und in der Kausalitätsdefinition zu berücksichtigen, mag für die Produktionswissenschaften eine Erweiterung des Begriffes nützlich sein.

Einige Gedankenansätze für einen erweiterten Kausalitätsbegriff sind im Rationalismus zu finden. Das Rationalisieren und die Wirtschaftlichkeit sind Fragen, die im Unternehmen unverzichtbar sind, und sie sind auch ein wichtiges Arbeitsfeld für die Produktionstechnik. Die Frage nach der Verhältnismäßigkeit der Mittel steht immer mit im Mittelpunkt. Bei vielen Fragen greift auch der Mensch mit seiner persönlichen Gewichtung und Wirkung in die Entscheidungsfindung ein. Am Ende eines jeden Prozesses, am Ende einer jeden Wertschöpfungskette, stehen allerdings in jedem Fall sehr **rationale und eindeutige Zielsetzungen (Kausalitätserwartungen)**. Auch die Ergebniserwartungen aus den Entscheidungsprozessen und angewandten Modellen sind letztlich sowohl **technisch rational** wie **wirtschaftlich rational**. Unter Berücksichtigung dieser zusätzlichen Aspekte mag der Gedanke in die Diskussion eingebracht werden, ob in der Produktionswissenschaft/Produktionstechnik nicht die Begriffe **rationale Kausalitätserwartung** oder auch **rationale Kausalität** den Definitionsumfang für Kausalitätsbezüge angemessen erweitern.

Konrad Bergmeister

Kausalität im Konstruktiven Ingenieurbau

1 Aufgaben des Konstruktiven Ingenieurbaus

Der Bauingenieur nennt sich im englischen Sprachbereich „civil engineer“. Damit ist seine Aufgabe zutreffender beschrieben als mit dem deutschen Titel Bauingenieur, der nur auf den Bau, nicht aber auf die Aufgabe, die Verantwortung für den Lebensraum und damit auf die Kausalität „Landschaft – Bauwerke – Räume – Menschen“, Bezug nimmt.

So war die Aufgabe des Bauingenieurs immer ein Dienst an der Gesellschaft. Seine Arbeit ist Teil der Gesellschaft und somit übernimmt er eine gesellschaftspolitische Verantwortung. Deshalb umfasst der Begriff des Kulturtechniklers weit besser die heutigen Aufgabengebiete des Bauingenieurs, nämlich die integrative Betrachtung der Bauwerke im Kontext der Natur, der Kunst und der Zeit.

Bauen war immer der sichtbare und erlebbare kulturelle Ausdruck künstlerischen Schaffens. Leonardo da Vinci steht exemplarisch für die Künstleringenieure des 15. und 16. Jahrhunderts. „Leonardo formulierte ganz bewusst“, schreibt der Historiker Eugenio Garin, „die Gebäude und Bauwerke müssen auf das Prinzip der Würde des Menschen zurückgeführt werden“. So ist der Künstler und Bauingenieur Erbauer eines Kosmos, in den der Mensch eingefügt ist.

2 Kausalität und der Begriff der Sicherheit

Der Begriff der Kausalität beschreibt das Maß des Zutreffens eines Zustandes, der entweder vorausgesagt oder rein zufällig auftritt. Nach Kant ist Kausalität ein Verstandesbegriff, mit dessen Hilfe die Erscheinungswelt geordnet und strukturierte Erfahrung ermöglicht wird. Die evolutionäre Erkenntnistheorie erklärt die Kausalität nahezu biologisch und unterscheidet zwischen regelmäßiger zeitlicher Aufeinanderfolge von Prozessen (post hoc) und kausaler Verknüpfung (propter hoc). Diese Auffassung steht nun im Widerspruch sowohl zur empiristischen Auffassung Humes als auch zum transzendentalphilosophischen

Verständnis von Kant. Konrad Lorenz zeigt hier einen ontologischen Unterschied in dem Energieübertrag auf, der bei kausalen Beziehungen immer besteht, während er bei rein zeitlichen Abfolgen von Prozessen nicht auftreten muss.

Im Konstruktiven Ingenieurbau geht man von einer Energieumwandlung aus, wobei sowohl die Energieart sich ändern kann (kinetische Energie zu Wärmeenergie), jedoch das Erhaltungsprinzip der Energie gilt. So wird auch zwischen den Einwirkungen (actio) und den Folgen, den Auswirkungen (reactio) auf ein bautechnisches System unterschieden, wobei die äußere Arbeit der inneren Formänderungsarbeit gleichzusetzen ist. Damit nun die Konstruktionen und Bauwerke entsprechend sicher sind, müssen die Einwirkungen, wie äußere Lasten, Eigengewicht etc., entsprechend kleiner als der vom Bauwerk aufbringbare Widerstand sein. Damit kommt der Begriff der Sicherheit in die Diskussion.

Im Bauwesen versteht man unter Sicherheit die qualitative Fähigkeit eines Tragwerkes, den Einwirkungen zu widerstehen. Natürlich kann ein Bauwerk nicht allen theoretisch möglichen Einwirkungen widerstehen, aber es muss den meisten der Einwirkungen in einem ausreichenden Maß widerstehen (ausgenommen akzeptierte Risiken, wie besondere Naturgefahren). Die Entscheidung, ob ein Bauwerk sicher ist oder nicht, muss mit einem quantitativen Maß erbracht werden. Die Zuverlässigkeit eines Tragwerkes ist ein solches quantitatives Maß. Diese wird in den gegenwärtig vorliegenden Bauvorschriften als Wahrscheinlichkeit interpretiert. Damit ist eine Aussage, ob ein Bauwerk sicher ist oder nicht, durch den Vergleich von Wahrscheinlichkeiten des Eintretens eines Versagens möglich. Die Sicherheit gilt dann als erbracht, wenn das vorhandene Risiko ein bei vergleichbaren Situationen von der Gesellschaft akzeptiertes Risiko nicht übersteigt.

Die in der technischen Literatur verwendete Darstellung des Risikos unter Berücksichtigung der Möglichkeit eines Schadensereignisses ist eng mit dem Begriff der Wahrscheinlichkeitsrechnung verbunden. Die Wahrscheinlichkeitsrechnung ist ein mathematisches Modell zur Beschreibung zufälliger Ereignisse. Sie dient im vorliegenden Fall dazu, basierend auf Häufigkeitsinformationen von Schadensfällen aus der Vergangenheit Rückschlüsse auf die zukünftige Wahrscheinlichkeit solcher Ereignisse zu ziehen. Den zufälligen Ereignissen, wie zum Beispiel Erdbebenbelastungen, werden Wahrscheinlichkeiten für ihr Eintreten zugeordnet.

Die Versagenswahrscheinlichkeit p_f einer Struktur kann aus der Zuverlässigkeit Z dieser Struktur bestimmt werden. Die Zuverlässigkeit und die Versagenswahrscheinlichkeit verhalten sich komplementär. Die Versagenswahrscheinlichkeit p_f einer Struktur lässt sich aus dem Tragwiderstand und aus den Einwirkungsgrößen ermitteln. Hierzu ist es notwendig, klare Grenzzustände zu definieren. Diese formulieren die Grenze zwischen der Erfüllung

und Nichterfüllung einer geforderten Bedingung, beispielsweise des Tragwiderstandes ausgedrückt in Form der Versagenswahrscheinlichkeit bzw. der Überlebenswahrscheinlichkeit.

Eine objektive Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeiten ist daher nur dann möglich, wenn die Versagenswahrscheinlichkeiten mit vergleichbaren Modellen gerechnet wurden, so dass die zuvor erwähnten Effekte in gleicher Art und Weise in den Modellen enthalten sind. Die operative Versagenswahrscheinlichkeit ist jene theoretische Wahrscheinlichkeit, die dem Ingenieur als Vergleichsgröße und Entscheidungshilfe zur Quantifizierung von Aussagen über die Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Konstruktion dienen kann.

Im Allgemeinen erfolgt die Beurteilung der Zuverlässigkeit bestehender Tragwerke derart, dass die Einwirkungen E auf die Konstruktion mit ausreichender Wahrscheinlichkeit kleiner oder gleich den Widerständen R sein sollen:

$$E \leq R.$$

Der Tragwerkswiderstand R wird auf Basis analytischer klassischer mechanischer Modelle definiert. Diese physikalischen mechanischen Modelle erhalten jedoch in Folge streuende Größen – die Basisvariablen – als Eingangsgrößen. Die Einwirkungen E erhält man durch Summation der auf das Tragwerk wirkenden Lasten und unter Berücksichtigung von maßgebenden Lastkombinationen. Diese Einwirkungen sind ebenso wie die Widerstände als Zufallsvariablen zu behandeln.

Die wesentliche Schwierigkeit bei der Beurteilung eines Bauwerkes besteht darin, dass die Basisvariablen der Widerstandsseite und der Einwirkungsseite nicht deterministisch vorliegen, sondern statistisch verteilte und oftmals vom Raum und der Zeit abhängige Variablen sind. Die Definition der Anforderungen an die Konstruktion in Form eines Zuverlässigkeitsniveaus, der geforderten Versagenswahrscheinlichkeit, ist eine weitere Problemstellung.

Die Versagenswahrscheinlichkeit p_f lässt sich aus der Zuverlässigkeit $(1 - p_f)$ einer Konstruktion ableiten. Von Interesse ist, mit welcher Wahrscheinlichkeit R kleiner als ein bestimmter Wert x ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass R kleiner x ist, lässt sich wie folgt darstellen:

$$P(R < x) = F_R(x).$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass $E = x$ ist, entspricht der Verteilungsdichtegröße der Einwirkung E an der Stelle x :

$$P(E = x) = f_E(x).$$

Ein Versagen tritt nun ein, wenn sowohl beide Gleichungen zutreffen. Wirtschaftliche Überlegungen können auch dazu führen, bestimmte Bauarten (z. B. Beleuchtungsmaste, Leitungsmaste) einer höheren Zuverlässigkeitsklasse und damit einer geringeren Versagenswahrscheinlichkeit zuzuordnen, wodurch verbesserte Überwachungs- und Kontrollmaßnahmen erforderlich werden. Diese Differenzierung umfasst auch die zeitliche Komponente der Sicherheit bzw. der Eintretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses. Die kausalen Zusammenhänge zwischen Einwirkungen und Strukturantwort bzw. Widerstand der Bauwerke, hängen durch die Degradation der Werkstoffe mit der Zeit und den räumlichen Umwelteinflüssen zusammen. Dadurch erfährt die Kausalität im konstruktiven Ingenieurbau eine neue Komponente, wo die Prozesse nicht deterministisch, sondern hauptsächlich stochastisch ablaufen.

3 Kausalität technischer System und die Erkenntnis der Gefährdung

Der Mensch und seine Umwelt – natürlich als auch künstlich geschaffene – ist grundsätzlich immer Risiken bzw. Gefahren ausgesetzt. Den Zusammenhang zwischen einer Ursache und der Wirkung ist im Bauwesen nicht immer widerspruchsfrei. Im Bereich dieser Wirklichkeitswissenschaften, wie es auch das Bauwesen ist, kommen zu den kausalen Kriterien noch viele weitere dazu. Dabei sind die stochastischen Prozesse der Einwirkungen und der Abläufe genau so wichtig wie die menschlichen Handlungen.

3.1 Menschliche Handlungen – Restrisiko

Am Restrisiko sind überwiegend menschliche Handlungen an der Gesamtzahl der Schäden, der Sachschäden und der Personenschäden beteiligt. Eine zentrale Rolle bei dem Versuch, die menschlichen Handlungen als positive Ablaufkriterien zu realisieren, spielen folgende Fragestellungen:

Wurden alle Aspekte bei der betrachteten Situation berücksichtigt?

Ist das Wissen der handelnden Person ausreichend?

Hat die handelnde Person genügend Einsicht in die vorliegende Situation?

Kann die handelnde Person gewonnene Erkenntnisse auf neue Situationen übertragen?

Ist das Können der handelnden Person ausreichend?

Ist sich die Person über falsche oder fehlende Handlungen bewusst?

Den menschlichen Fehlhandlungen kann jedoch entsprechend ihres Auftretens mittels geeigneter Maßnahmen begegnet werden. Maßnahmen gegen menschliche Fehlhandlungen können sein:

Bereich	Maßnahme
Objektiv unbekannte Gefahren	Förderung der Grundlagenforschung
Subjektiv unbekannte Gefahren	Ausbildung – Veröffentlichung von schlechten Erfahrungen
Unberücksichtigte Gefahren	Definition von Verantwortlichkeit Definition von Kompetenzbereichen Bekämpfung von Sorglosigkeit Bekämpfung von Nachlässigkeit, Fahrlässigkeit und Ignoranz
Unzweckmäßige Maßnahmen, fehlerhafte Anwendungen	

Erste Zielsetzung der Beschreibung eines kausalen Prozesses im Bauwesen ist es, die objektiv bekannten Gefahren auch subjektiv zu erkennen und diese durch geeignete Maßnahmen abzuwehren. Für dieses Unterfangen ist ein rationales Entscheidungsmodell zu schaffen. Dieses Entscheidungsmodell muss Elemente der Gefährdungsanalyse und der Maßnahmenplanung enthalten, um die geforderte Sicherheit zu erzeugen. Die geforderte Sicherheit ist mit den bewusst akzeptierten Risiken und mit den Gefahren aus menschlichen Fehlhandlungen eng verbunden.



Abbildung 1
Restrisiken

3.2 Gefährdungsanalyse und Maßnahmenplanung

Als Mittel für die Bestimmung des Gefährdungspotentials einer Situation dient die kausale Beschreibung von Gefährdungsprozessen, die Gefährdungsanalyse. Ziel der Gefährdungsanalyse ist, die möglichen Gefahren zu erkennen, die erkannten Gefahren zu analysieren und in der Folge geeignete Gegenmaßnahmen zu finden. Das Erkennen und Analysieren von Gefahren setzt jedoch einen hohen Grad an Vorstellungskraft, an Kreativität und an Logik des Ingenieurs voraus. Kritische Situationen während der Bau durchführung, aber auch nach der Bau fertigstellung zu erkennen, bedürfen neben der Modellierung von Abläufen auch großer Erfahrung. Hier tritt die Erfahrung in die Kausalitätsbetrachtung ein. Nun gelingt es nicht mehr das Ursache-Wirkungs-Schema anzusetzen, sondern nun kann jedes Element innerhalb einer Analyse der Gefährdungsprozesse sowohl Ursache als auch Wirkung sein. Piaget spricht deshalb von Rückkoppelungskausalität und von einer Revision des Kausalbegriffes in kybernetischer Richtung.

3.3 Gefahren für das Bauwerk bzw. den Menschen

Ein Bauwerk sowie die das Bauwerk benützenden Menschen sind vielfältigen Gefahrensituationen während der Lebensdauer ausgesetzt. Diese Gefahrensituationen sind sehr vielfältig. Die Gefahren resultieren aus der Wechselbeziehung von Situationen aus der Natur und Situationen aus menschlicher Tätigkeit und Nutzung.

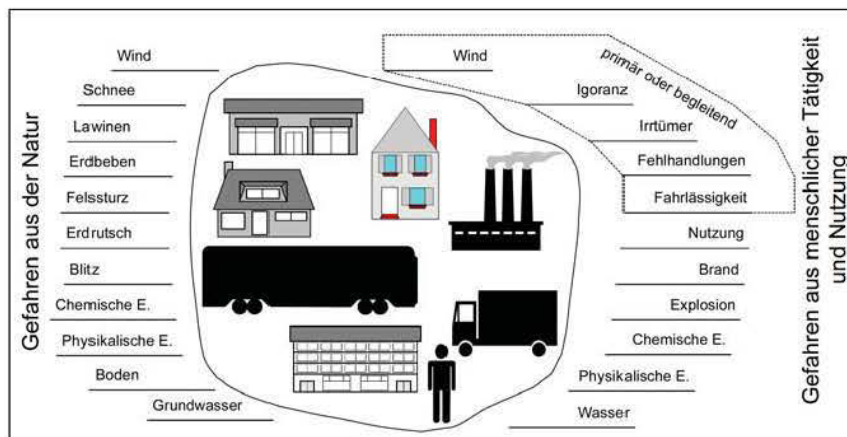


Abbildung 2
Gefahren für das Bauwerk bzw. den Menschen

Zur möglichst umfangreichen Erfassung möglicher Gefahren gibt es einige sehr effiziente Techniken bzw. methodische gedankliche Ansätze.

3.4 Techniken zur Gefahrenerkennung

3.4.1 Die chronologische Vorgehensweise

Bei der chronologischen Vorgehensweise werden Schritt für Schritt die Gefahrenpotentiale analysiert. Man kann diese Vorgangsweise als eine kausale Abfolge von Analyseschritten bezeichnen.

3.4.2 Die Nutzungsanalyse

Die Zielsetzung dabei ist die Analyse des Nutzungsprozesses und dessen Finalität. Der Begriff der finalen Ursache, den Aristoteles entwickelt hat, wird durch den Ansatz der Rückkoppelungskausalität ersetzt. Es ist klar, dass die kausale Abfolge von Gefahrensituationen analysiert werden kann und für das Verständnis wichtig ist, jedoch die Nutzung des Bauwerkes höchste Priorität hat. Ähnlich hat auch Konrad Lorenz 1940 argumentiert, nämlich dass für ihn das Verstehen der Welt nichts primär Denknötwendiges darstellt, sondern vielmehr die Leistung des gesamten Systems (bei ihm war es das zentrale Nervensystem).

3.4.3 Die Einflussanalyse

Für eine Situation bzw. eine Problemstellung sind die wesentlichen Einflussgrößen aufzufinden. Eine Erleichterung ergibt sich, durch Differenzierung in menschlich verursachte und aus der Umwelt resultierende Einflussgrößen. Die Unterlassung von Tätigkeiten kann ebenfalls zu wesentlichen Einflussgrößen führen. Bei dieser Analyse spielt die zeitlich und räumlich versetzte Auftretenswahrscheinlichkeit der Einflussgrößen eine bedeutende Rolle.

3.5 Techniken zur Bewertung kritischer Situationen

Zur Auffindung von kritischen Situationen gibt es ebenfalls mehrere Zugangsmöglichkeiten. Häufig wird dabei die Fehlerbaumanalyse, das heißt das Arbeiten mit logischen Bäumen verwendet. Diese Methodik ermöglicht eine logische Ergründung der Situation und schafft Ordnung und Übersichtlichkeit. Die Fehlerbaumanalyse (auch genormt in der DIN 25424) ist eine Methode, mit der sich die logischen Verknüpfungen von Komponenten- und Teilsystemausfällen, die zu einem unerwünschten Ereignis führen, ermitteln

lassen. Die erhaltenen Ergebnisse lassen sich sowohl qualitativ als auch mit den Methoden der Logik-Algebra quantitativ analysieren. Man kann also die verschiedenen Ausfallkombinationen, die zum unerwünschten Ereignis führen, mitsamt ihren Eintrittshäufigkeiten ermitteln. Die Vorgehensweise ist hierbei deduktiv. Für ein vorgegebenes Ereignis werden die Ursachen bestimmt, wodurch auch von einer Rückkoppelungskausalität ausgegangen werden kann.

3.6 Gefährdungsbilder

Als Gefährdungsbilder oder auch Hazard Scenario werden Situationen genannt, in denen Gefahren räumlich und zeitlich miteinander wirken. Die Gefährdungsbilder erlauben eine Gliederung in:

- Situation
- Leitgefahr
- Begleitumstände

Die Variation der Leitgefahr ermöglicht erst die Klassifizierung der Gefährdungsbilder und in Folge die Auffindung des maßgebenden Gefährdungsbildes.

Das gesamte Gefährdungspotential wird auch als objektives Gefährdungspotential bezeichnet. Leider ist das objektive Gefährdungspotential niemals vollständig bekannt, da es unmöglich ist, die Gesamtheit der Gefahren zu kennen. Dem bekannten subjektiven Gefährdungspotential – dies ist eine Teilmenge des objektiven Gefährdungspotentials – kann jedoch in zwei verschiedenen Formen begegnet werden:

- die Gefahren bewusst akzeptieren und
- die Gefahren mit geeigneten Maßnahmen abwehren.

Diese Erfassung des Gefährdungspotentials mündet in drei Kategorien,

- in das bewusst akzeptierte Risiko,
- in die Sicherheit durch Maßnahmen,
- in die Gefahren durch menschliche Fehlhandlungen.

Die Gefahren zu akzeptieren, hat ein bewusst akzeptiertes Restrisiko zur Folge. Aufgrund der subjektiv unerkannten, der vernachlässigten Gefahren und aufgrund von nicht geeigneten Maßnahmen entstehen die durch menschliche Fehlhandlungen verbleibenden Restrisiken. Diese Restrisiken sind ein vorhandener Bestandteil unseres Lebens und sollten durch entsprechende Vorkehrungen so klein als möglich gehalten werden. Die bewusst akzeptierten Restrisiken bilden gemeinsam mit den aus menschlichen vielfältigen Fehlhandlungen resultierenden Restrisiken das vorhandene Restrisiko.

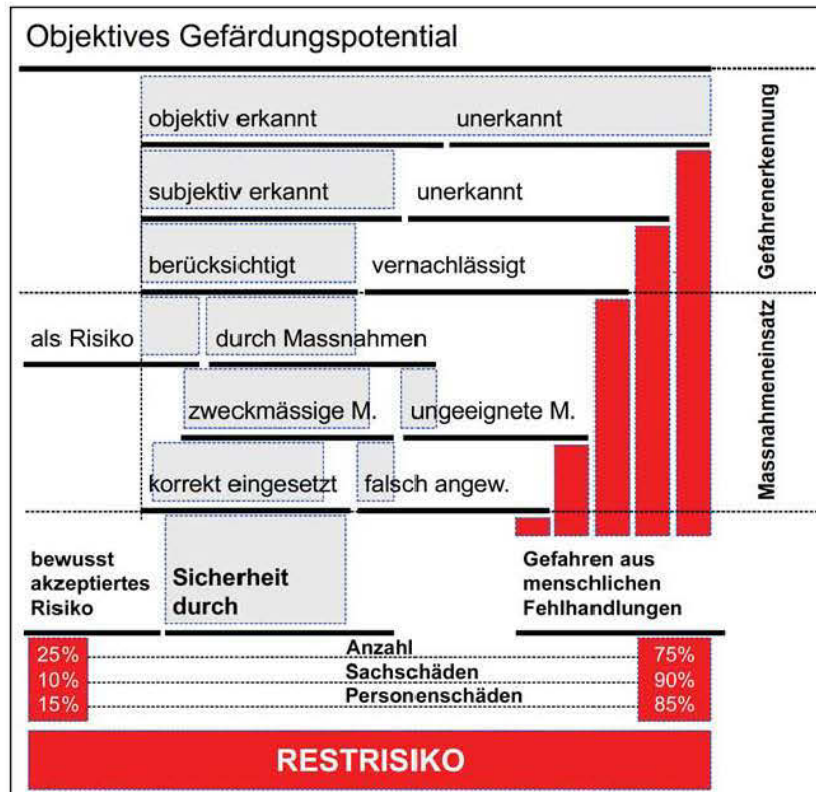


Abbildung 3
Gefährdungspotential

4 Kausale Zusammenhänge im Konstruktiven Ingenieurbau

4.1 Kausalität – Rückkoppelungskausalität

Der konstruktive Ingenieurbau baut in seinem Grundlagenwissen auf die Mathematik und Physik auf und arbeitet mit zumindest kausal verständlichen Modellen, welche die Wirklichkeit zu beschreiben versuchen. Unter Wirklichkeit versteht man hier das reale Verhalten von Baustoffen wie Beton, Stahl, Holz, Mauerwerk, Verstärkte Kunststoffe und Glas unter nicht immer eindeutig vorherseh- und beschreibbaren Einwirkungen. Diese technische Disziplin geht über rein anthropomorphe Strukturen (Anschaulichkeit, Alltagserfahrung etc.) weit hinaus.

Die Kausalität der Wirkungen eines bautechnischen Systems kann nicht auf reine Regelmechanismen beschränkt werden. Dabei spielt die Rückkoppelungskausalität eine ganz wesentliche Rolle. Denken wir an natürliche Naturereignisse, welche auf Schutzkonstruktionen einwirken. Sofern diese Schutzbarrieren (Wildbachsperrern, Stützbauwerke etc.) genügend Sicherheit aufweisen und dem Naturereignis Widerstand leisten, haben sie eine konkrete Wirkung in Bezug auf die Ursache des Naturereignisses. Treten aber Versagensmechanismen im Erdreich bzw. im Fundamentbereich dieser Schutzkonstruktionen auf, dann können plötzlich durch das Abrutschen dieser Schutzbauwerke neue Ursachen für weit größere Wirkungen bzw. Schäden entstehen.

Auch im nichtlinearen Werkstoffverhalten von gerissenem Konstruktionsbeton gibt es diese Rückkoppelungskausalität. Überschreitet ein Bauelement aus bewehrtem Stahlbeton die Zugkapazität des Betons, dann reißt der Beton in bestimmten Abständen (Rissabstände). Durch diese Risse entsteht aber nicht nur ein nichtlineares und damit duktileres Bauteilverhalten, sondern es können durch diese Risse auch Umweltmedien (Cloride, Feuchtigkeit etc.) eindringen, wodurch die Stahlbewehrung korrodieren kann.

4.2 Rückkoppelungskausalität von gerissenem Konstruktionsbeton

Im Konstruktionsbeton bleibt die Betonkapazität das schwache Glied. Wird durch eine externe Beanspruchung oder einen Zwangszustand (Temperatur etc.) diese Betonfestigkeit überschritten, dann führt dies zu Rissen. Im Allgemeinen kann man von folgenden drei Bereichen ausgehen:

- Elastischer Bereich
- Fließen der Bewehrung im Rissbereich
- Fließen der Bewehrung über die gesamten Risselemente

Entscheidend ist, gerade für den Übergang vom elastischen Bereich zum Rissbereich, die Zugfestigkeit des Betons. Sie unterliegt großen Streuungen, ist daher eine stochastisch zu betrachtende Variable mit einer großen Sensitivität für das Gesamtsystem. Die Größe ist zusätzlich abhängig von zahlreichen Faktoren wie Eigenspannungen aus Temperatur und Schwinden des Betons.

Bei einer Belastung eines Bauwerkes aus Konstruktionsbeton wird die Zugfestigkeit nach einem anfänglich linearem Verhalten auf Grund von Mikrorissbildung geringer, bis sich der erste Riss einstellt. Durch die fortschreitende Rissbildung entsteht lokal eine starke Verformung in der Risszone bei gleichzeitiger Entlastung des restlichen Bereiches.

Die Ursache im Sinne der Kausalität ist damit die Einwirkung, welche den Beton über die Zugkapazität beansprucht.

Die unmittelbare Wirkung sind je nach Bewehrungsart und -menge Risse, welche sich bis zu einer gewissen Breite (trockene Umgebung: Rissbreite $< 0,4$ mm, bzw. wechselnde Umgebungseinwirkungen: Rissbreite $< 0,3$ mm) in gewissen Abständen (Rissabstände) öffnen.

Die Rückkoppelung dieser kausalen Zusammenhänge kann aber zu Folgeschäden führen. Treten durch diese Risse Umgebungsmedien zum im Beton liegenden Bewehrungsstahl ein, kann es zu Korrosion und in Folge auch zu lokalen Abplatzungen bzw. Bruchvorgängen kommen. Korrosion der Bewehrung ist die Hauptursache für Schädigung und frühzeitiges Versagen von Stahlbetonbauwerken. Dabei spielt auch die Zeit eine wichtige Rolle. Deshalb ist die Anwendbarkeit einer klassischen Erkenntnistheorie sowohl durch die stochastisch verteilten Umweltbedingungen als auch durch die wechselseitige Unabhängigkeit von Raum und Zeit nicht mehr gegeben.

Die Kausalität liefert daher für die Wirkungsprozesse im Bauwesen und insbesondere im konstruktiven Ingenieurbau keine eindeutig wiederholbaren Ergebnisse. Der Riss in einem Betonkörper bzw. der Korrosionsbeginn an einer Stahlbewehrung erfolgt nach stochastischen Gesetzen; aber weder der Ort des Bruchvorganges noch der Zeitpunkt, zu dem er einsetzt, kann mit den derzeitigen Modellen eindeutig vorausgesagt werden. Man kann die Phänomene erklären und die Erfahrungserkenntnis (nicht die Erfahrung) durch wissenschaftliche Theorien belegen.

4.3 Kausalerwartung bei der Interaktion Bauwerk – Baugrund

Das integrative Betrachten von einwirkenden Bauelementen bzw. Bauwerken auf Böden verlangt eine statische Charakterisierung bzw. Modellierung. Dabei geht man näherungsweise von vereinfachten Modellen aus, um die Wechselwirkungen darzustellen und die zu erwartenden Schnittgrößen, wie Biegemomente an einem modellhaften Bauteil und die dabei zu erwartenden Setzungen, zu berechnen.

Bei Einwirkung einer Einzelkraft oder einer gleichmäßig verteilten Einwirkung kann die Ermittlung der größten Setzung und des maximalen Biegemomentes mithilfe eines Biegebalkens erfolgen. Die Biegebemessung und damit die Ermittlung der Setzungen von einem Fundamentbalken kann mit den geometrischen Dimensionen, dem Elastizitätsmodul des Fundamentes, dem Flächenträgheitsmoment des Fundamentes und den bodenmechanischen Kennwerten, wie Bettungsmodul etc., ermittelt werden.

Über diese vereinfachten Modelle können aus baustatischen Überlegungen heraus mit bodenmechanischen Kennwerten die Setzungen von Bauwerken abgeschätzt werden.

Mit einer bestimmten Kausalerwartung werden Wirkungen über vereinfachte Modelle aus relativ schwierig beschreibbaren Ursachen abgeleitet. Nach Kant ist die Kausalität ein Verstandesbegriff, mit dessen Hilfe die Erscheinungswelt geordnet und strukturiert betrachtet werden kann. Die evolutionäre Erkenntnistheorie spricht im Falle der Kausalität von kausaler Interpretation. Das trifft auch im Bauwesen zu.

Es sollte in den technischen Wissenschaften sowie auch in den Naturwissenschaften einen ontologischen Unterschied zwischen regelmäßiger und prognostizierbarer Abfolge (post hoc) und kausaler Verknüpfung (propter hoc) geben. Diese Vermutung steht zwar im Widerspruch sowohl zur empiristischen Haltung von Hume, als auch zur transzendentalphilosophischen Auffassung Kants; sie folgt aber der evolutionären Erkenntnistheorie.

5 Erkenntnis und Realität

In den technischen Wissenschaften sowie im konstruktiven Ingenieurbau versucht man durch Beobachtung, Experiment und logisch ableitbare Modelle die Realität zu beschreiben.

Kann man aber alle oder wenigstens einige Erkenntnisse klar beweisen? Jahrhunderte lang war man davon überzeugt, dass man die „technischen und physikalischen Wissenschaften“ durch Beweise belegen kann. Bereits Aristoteles wollte die Wissenschaft auf Grundsätzen aufbauen, die unmittelbar evident und darum eines Beweises weder bedürftig noch fähig sind. Auch Pascal hielt es für möglich, geometrische Beweise auf selbstevidente und deshalb wahre Axiome zu stützen (Pascal – Vom Geiste der Geometrie: Die Geometrie setzt nur Dinge voraus, welche durch die natürliche Einsicht klar und sicher sind, und deshalb ist sie vollkommen wahr).

Wissenschaftliche Hypothesen und Theorien sind im Allgemeinen und insbesondere im Bauwesen nicht voraussetzungslos beweisbar. Es ist nur möglich, von unbewiesenen Prämissen auszugehen und zu prüfen, was aus ihnen folgt, wenn man bestimmte Schlussfolgerungen zulässt. Solche unbewiesenen Prämissen nennt man in den Naturwissenschaften „Axiome“, oder „Postulate“. Ein Axiom ist somit kein unbeweisbarer oder gar selbstevidenter Satz, sondern ein Satz, auf dessen Beweis man verzichtet. Eine auf Axiomen aufgebaute Modellvorstellung stellt zwar einen archimedischen Punkt einer Theorie dar, nicht jedoch der Wirklichkeitstheorie.

Auch Einstein stellte fest, dass „die einer Theorie zugrunde liegenden Begriffe und Grundgesetze ... freie Erfindungen des menschlichen Geistes sind, 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“, weshalb die Mathematik oder die Naturwissenschaften keine sichere Erkenntnis über die Welt liefern.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass man im Bauwesen, insbesondere im konstruktiven Ingenieurbau, nicht von der reinen Kausalität, sondern von erkenntnistheoretischen Erfahrungsprozessen ausgeht, die in den so genannten Elementarsätzen (Wittgenstein), Konstatierungen (Schlick), Beobachtungen (Carnap) oder Basissätzen (Popper) ihre sprachliche Interpretation finden.

Olaf Dössel

Kausalität bei der Entstehung, der Diagnose und der Therapie von Krankheiten – aus dem Blickwinkel des Ingenieurs

In diesem Artikel werden die Entstehung, die Diagnostik und die Therapie von Krankheiten in einen Bezug zur Kausalität gesetzt, das heißt zu Begriffen wie Ursache, Folge und Wirkung. Das Thema wird ganz bewusst aus dem Blickwinkel des Ingenieurs, genauer gesagt des Medizintechnikers, betrachtet. Hierbei erscheint der Mensch als mehr oder weniger „berechenbares Objekt“, ja manchmal wie eine Maschine, die einen Defekt aufweist, und die man versucht, zu reparieren. Dies ist natürlich eine sehr verkürzte und eingeschränkte Sichtweise auf den Menschen und auf die Problematik der Entstehung, der Diagnostik und der Therapie von Krankheiten. Aber es ist in gewisser Weise der Blickwinkel der Medizintechnik auf den Patienten. Hierbei soll gleich zu Beginn sehr deutlich festgestellt werden, dass die Medizintechnik sich mit diesem Ansatz immer nur als Hilfe und Unterstützung für den Arzt sieht, ihn aber niemals ersetzt. Der Arzt ist darum bemüht, den Menschen und das Phänomen „Krankheit“ als Ganzes zu sehen. Medizintechnik ist ein sehr erfolgreiches Werkzeug bei der Erkennung und Therapie von Krankheiten, aber eben nur ein Werkzeug, welches zum Beispiel um psychische und psychosomatische Aspekte erweitert werden muss, wenn Patienten geheilt werden sollen.

Zunächst sollten ein paar Begriffe geklärt werden, die dem Arzt selbstverständlich bekannt, aber nicht jedem Ingenieur oder Naturwissenschaftler geläufig sind: **Diagnostik** bedeutet, einer Krankheit einen Namen zu geben, und damit den Patienten einer bestimmten Gruppe zuzuordnen. **Physiologie** und **Pathophysiologie** sind die Lehren von der Funktion des gesunden und erkrankten Körpers. **Pathogenese** beschreibt die Entwicklung pathophysiologischer Prozesse bis zum Ausbruch einer Krankheit, das heißt bis zum Auftreten von Beschwerden des Patienten und zur Ausprägung einer typischen Symptomatik. **Ätiologie** ist die Lehre von den Ursachen der Krankheiten. Der Begriff ist aus dem Griechischen abgeleitet: *aitia* ist die Ursache. Der Begriff **Kausalität** kommt aus dem Lateinischen und bezeichnet die Ursächlichkeit, den Folgenzusammenhang von Ursache und Wirkung, womit die enge Beziehung zwischen Ätiologie und Kausalität hergestellt

ist. In der Ätiologie wird nach dem ersten und originären Schlüsselereignis gesucht, welches dann in einer kausalen Kette zu einer Krankheit führt. **Symptome**, die sich bei der pathophysiologischen Entwicklung ausbilden, werden zum Zwecke der Diagnostik gemessen, um dann eine Therapieentscheidung zu treffen. **Therapie** bedeutet schließlich, Maßnahmen zu ergreifen, welche die Krankheit heilen oder, falls dies nicht möglich ist, die unangenehmen Folgen für den Patienten abmildern.

Hier ergeben sich mehrere Fragen in Zusammenhang mit der Kausalität:

- Ist die Kette vom Symptom zur Klassifikation, das heißt die Diagnostik streng kausal?
- Ist die Physiologie und damit auch die Pathophysiologie kausal? Das heißt, ist die physiologische Zukunft eines Lebewesens aus den Anfangsbedingungen berechenbar?
- Ist die Ätiologie, also die eigentliche Entstehung einer Krankheit kausal? Hat jede Krankheit einen Grund?
- Ist die Pathogenese kausal? Verläuft eine Krankheit, nachdem sie einmal ausgelöst wurde, immer nach der gleichen Gesetzmäßigkeit?
- Jede Therapieplanung stützt sich auf Kausalität: wenn ich eine bestimmte therapeutische Maßnahme ergreife, gehe ich davon aus, dass sie in der Folge die gewünschte heilende oder lindernde Wirkung hat.
- Leider stellt sich oft heraus, dass die Therapie nicht so verläuft wie erhofft. Eine strenge Kausalität ist offenbar nicht immer anzutreffen. Oder liegt das nur an einer unzureichenden Kenntnis über den Ausgangszustand. Würde eine noch detailliertere Diagnostik streng kausal zu einem 100%igen Therapieerfolg führen?

Alle diese Punkte sollen im Folgenden etwas beleuchtet werden. Es ist schon zu ahnen, dass die genannten Bereiche einen hohen Anteil an Stochastik aufweisen. Dies führt zu ethischen Konflikten, die ebenfalls betrachtet werden sollen.

Aber zunächst soll ein Einschub folgen: Wie kommt der Zufall in diese Welt? Hierfür steht an anderer Stelle schon sehr viel, daher sollen hier nur ein paar wenige Gedanken referiert werden, die für das Folgende wichtig sind.

Die Quantenmechanik lehrt, dass in vielen Fällen für das Ergebnis von Messprozessen nur Wahrscheinlichkeitsaussagen getroffen werden können. Die Zeit, zu der ein radioaktives Isotop zerfällt, ist prinzipiell nicht bestimmbar, aber von einem großen Ensemble werden nach der Halbwertszeit die Hälfte aller Kerne zerfallen sein.

Die Theorie dynamischer Systeme, manchmal auch „Chaostheorie“ genannt, beschreibt komplexe, oft nicht-lineare Prozesse, bei denen eine infinitesimal kleine Änderung der Anfangsbedingungen zu einem völlig anderen Verlauf führt. Oft wird der Flügelschlag des Schmetterlings in der Karibik zitiert, der in der Folge zu einem ganz anderen

Wetter in Europa führt. Dahinter stehen mathematische Modelle, mit denen der zukünftige Zustand eines Systems aus dem aktuellen Zustand berechnet werden kann. Der Zustand wird durch mehrere Zustandsvariablen vollständig beschrieben. Die Historie und die Zukunft eines bestimmten Systems ist eine Trajektorie im Zustandsraum. Bei diskreten Systemen wird der zukünftige Zustand durch eine Abbildungsgleichung aus dem momentanen berechnet, kontinuierliche Systeme werden durch gekoppelte Differentialgleichungen beschrieben. Markov-Ketten werden durch eine Matrix beschrieben, welche die Übergangswahrscheinlichkeiten von einem Zustand in die anderen möglichen Zustände angibt. Oft sind die Zustandsvariablen nicht direkt messbar. Der Kalman-Filter enthält eine Methodik, mit der Zustandsvariablen aus verrauschten Messdaten geschätzt werden können (Abb. 1).

Es sind vielfältige Trajektorien im Zustandsraum möglich (Abb. 2). Interessant sind Trajektorien, bei denen alle möglichen Anfangszustände in den gleichen stabilen Endpunkt (Fixpunkt) laufen. Andere, wie der harmonische Oszillator, bilden geschlossene Kurven im Zustandsraum. Wiederum andere laufen durch den Zustandsraum ohne jemals an ihren Ausgangspunkt zurück zu kommen: hier spricht man von Chaos. In der Chaostheorie lernt man, verschiedene Varianten in dieser Trajektorien-Familie zu charakterisieren und zu unterscheiden. Oft enthalten die mathematischen Modelle, mit denen die Zukunft aus dem „Jetzt“ berechnet wird, Parameter, und es ist interessant zu untersuchen, wie das System von diesen Parametern abhängt. Wenn eine infinitesimal kleine Änderung eines solchen Parameters zu einem völlig anderen Verlauf im Zustandsraum führt, spricht man von einer Bifurkation.

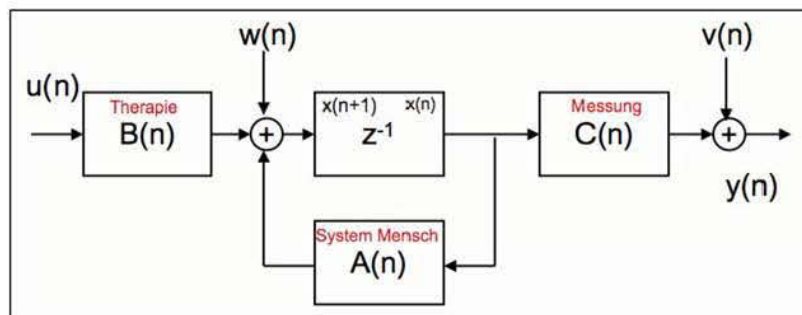


Abbildung 1

Die Methodik des Kalman-Filters, angewendet auf den Menschen
 $x(n)$: Zustandsvektor, $A(n)$: Abbildung, die das System vom Zustand n in den Zustand $n+1$ führt,
 $B(n)$: Abbildung, die von den Steuergrößen $u(n)$ auf die Zustandsvariablen führt, $C(n)$: Abbildung
von den Zustandsvariablen $x(n)$ auf die Messgrößen $y(n)$, $w(n)$: Modellrauschen, $v(n)$: Messrauschen

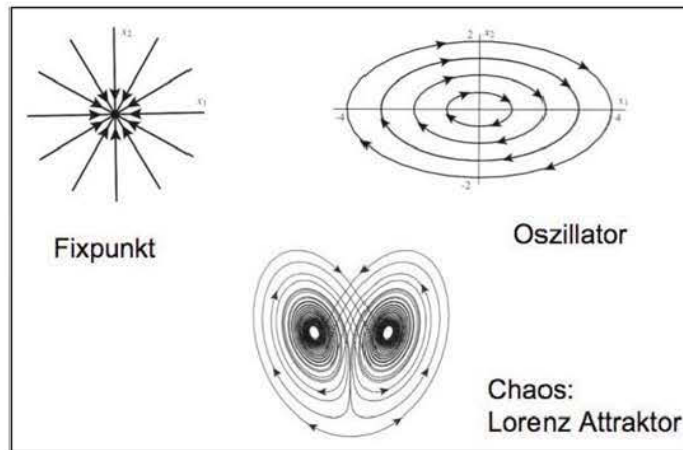


Abbildung 2
 Verschiedene Familien von Trajektorien im Zustandsraum

Was hat das Ganze mit unserem Thema zu tun? Können wir das System Mensch als physiologisches Objekt oder wenigstens Teilsysteme davon exakt durch Zustandsvariablen beschreiben und die Zukunft mit Hilfe einer mathematischen Abbildung vorhersagen? Können wir durch Messungen diese Zustandsvariablen bestimmen oder zumindest schätzen? Wie hängt die Abbildung in die Zukunft von freien Parametern ab? Müssen wir mit Bifurkationen rechnen? Können wir durch therapeutische Maßnahmen das System Mensch von einer ungünstigen, das heißt pathologischen Trajektorie in einen gesunden Bereich im Zustandsraum führen? Bei einer positiven Antwort auf diese Fragen müssten offenbar auch die in der Einleitung gestellten Fragen zur Kausalität bei der Entstehung, Diagnose und Therapie von Krankheiten positiv beantwortet werden.

Eine vergleichsweise neue Wissenschaft ist die „mathematische Physiologie“ (Mathematical Physiology) oder „mathematische Biologie“ (Computational Biology). Hierbei geht man über die eher empirische Beschreibung, wie eine physiologische Messgröße von einer anderen abhängt, hinaus. Man sucht nach geeigneten Zustandsvariablen und mathematischen Modellen, mit denen das biologische System und seine Dynamik vollständig beschrieben werden können.

Als Beispiel soll die Beschreibung der Elektrophysiologie einer Herzmuskelzelle dienen. Zustandsvariablen dieses Systems sind die von Hodgkin und Huxley eingeführten „Gating Variables“, die das Öffnen und Schließen von Ionenkanälen beschreiben. Es werden gekoppelte Differentialgleichungen oder Markov-Ketten als mathematisches Modell verwen-

det. Parameter des Modells, die sich aus Messungen ableiten lassen, sind die Ratenkonstanten zum Öffnen und Schließen der „Gates“ und die Häufigkeit, mit der ein bestimmter Ionenkanal in eine Zelle exprimiert und eingebaut wird. Es gibt Zellen, die nach einem Anstoß von außen immer in ihren Grundzustand (Ruhepotential = Fixpunkt des Systems) zurückfallen. Bei anderen Zellen, zum Beispiel im Schrittmacherzentrum des Herzens (Sinusknoten), ergibt sich eine geschlossene Trajektorie im Zustandsraum: das Herz schlägt autonom und spontan. Bei Herzrhythmusstörungen beobachtet man chaotische Trajektorien (Abb. 2).

Ein anderes damit verwandtes Beispiel ist die Elektrophysiologie des Herzens bei einer Herztransplantation. Beim „Einbau“ des Spenderherzens in den Empfänger ist das Herz abgekühlt und schlägt nicht. Dann erwärmt der Herzchirurg das Herz, zum Beispiel mit seiner Hand, und es beginnt spontan zu schlagen. Der Parameter „Temperatur“ wird langsam erhöht und bei einer bestimmten Stelle durchläuft das System eine Bifurkation: aus einem stabilen Fixpunkt wird ein Oszillator, das heißt eine geschlossene Trajektorie im Zustandsraum. Man kann zeigen, dass es sich um eine so genannte Hopf-Bifurkation handelt.

Die mathematische Beschreibung all dieser Prozesse ist heute mit hoher Präzision möglich. Das gesunde Herz, aber auch viele Rhythmusstörungen wie Vorhofflattern und Vorhofflimmern lassen sich aus dem mathematischen Modell des Herzens ableiten. Im Artikel von S. Laureys im *Spektrum der Wissenschaft*, Februar 2006, findet sich der Satz: „der Tod ist eine superkritische Hopf-Bifurkation“, das heißt auch hier bedienen die Autoren sich der Nomenklatur der Dynamik komplexer Systeme. Lassen sich damit Physiologie und Pathophysiologie mathematisch und kausal exakt beschreiben? Wenn dies heute noch nicht perfekt gelingt, so liegt das vielleicht nur daran, dass wir einige Details noch nicht genau genug kennen. Wird irgendwann die physiologische Zukunft eines Menschen berechenbar und damit vorhersagbar?

Erinnern wir uns an die in der Einleitung aufgeworfene Frage: wie kommt der Zufall in die Welt? Je weiter wir uns in unserer mathematischen Beschreibung auf das molekulare Niveau begeben, wird notwendigerweise der „quantenmechanische Zufall“ eine stochastische Komponente in das System einbringen. Und da es sich beim Menschen ganz offensichtlich um ein komplexes nichtlineares System handelt, werden Ergebnisse der Chaostheorie anwendbar: ein infinitesimal kleiner Fehler bei den Anfangsbedingungen oder bei den Modellparametern kann zu einem vollständig anderen Weg in die Zukunft führen!

Betrachten wir unter diesem Blickwinkel die Ätiologie. Der Mensch hat schon immer eine kausale Kette bei der Entstehung von Krankheiten angenommen, manchmal schlicht postuliert oder auch mit Komponenten von Aberglauben oder religiösen Vorstellungen herbeigedacht:

- Der Mensch hatte selber schuld, dass er krank wurde: er hat einfach zu viel gegessen und „gesoffen“.
- Kein Wunder, dass Du einen Schnupfen bekommen hast: du hast wohl keine Mütze auf dem Kopf gehabt!
- Dass dieser Mensch krank wurde, ist einfach nur die gerechte Strafe Gottes!
- Das Schicksal hat die Krankheit herbeigeführt, seinem Schicksal kann keiner entrinnen!

Selten findet man in der Literatur oder in den Köpfen der Menschen die Vorstellung, dass Krankheit einfach nur durch einen Zufall ausgelöst wurde („Gott würfelt nicht“).

Folgende Möglichkeiten für eine „erste Ursache“ von Krankheiten werden in der Medizin angegeben:

- Erbkrankheiten,
- Neubildungen (Krebs),
- Autoimmunkrankheiten,
- Infektionen,
- Verletzungen,
- Vergiftungen,
- Gewebedegeneration (Alterungsprozesse).

Manchmal genügt ein einziger Auslöser, um die kausale Kette einer Erkrankung in Gang zu setzen (z. B. HIV Infektion). Manchmal müssen mehrere Auslöser zusammen kommen, damit der krankhafte Prozess beginnt (z. B. erbliche Disposition plus karzinogener Stoff). In beiden Fällen würde man von einer strengen Kausalität sprechen. Manchmal müssen aber auch sehr viele Auslöser gleichzeitig zusammen kommen – so viele, dass die Randbedingungen des Systems „Mensch“ unmöglich genau bekannt sein können. In diesem Fall wird man de facto von Zufall sprechen. Manchmal – eher selten? – löst ein „quantenmechanischer Würfel“ eine kausale Kette aus, die zu einer Krankheit führt. 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.

Handelt es sich nur um einen einzigen Auslöser (z. B. bei einer Allergie) oder um zwei Auslöser (Berührung mit der Herkules-Staude und UV-Strahlung), so können diese Auslöser relativ leicht erkannt und im Sinne einer primären Prävention vermieden werden. Bei mehreren Auslösern wird dies zunehmend schwieriger. Je genauer ein Individuum seine Wahrscheinlichkeiten – beispielsweise mit Hilfe einer genetischen Profilanalyse – kennt, um so mehr wird es ihm möglich, durch Vermeidung der Auslöser Krankheiten zu vermeiden.

Der gleitende Übergang von Kausalität zu Stochastik kann schwierige Probleme aufwerfen. Betrachten wir als Beispiel Erbkrankheiten, die einerseits mit großer Sicherheit zur Ausprägung kommen (z. B. Bluter-Krankheit bei männlichen Nachkommen), und andererseits nur zu genetisch bedingten Dispositionen führen, also nur die Wahrscheinlichkeit einer Erkrankung erhöhen (z. B. Mammakarzinom). Während die meisten Deutschen eine Abtreibung befürworten, wenn ein Gentest beweist, dass der Embryo an einer schwerwiegenden Erbkrankheit leidet, ist die Entscheidung nicht so klar, wenn ein ungeborenes Mädchen „nur“ mit 90%iger Wahrscheinlichkeit einmal an einem Mammakarzinom erkranken wird.

Ein anderes Beispiel, bei dem die unklare Kausalitätskette zur Krankheitsentstehung zu einem Dilemma führt, ist folgendes: Die Behandlung einer Krankheit, die sich ein Mensch bewusst selber zufügt, sollte langfristig nicht mehr von der Krankenkasse erstattet werden, oder zumindest zu einer deutlichen Erhöhung der Beiträge führen – bis hierher würden viele Leser sofort zustimmen. Wie aber würden Sie entscheiden, wenn ein Lungenkarzinom mit 95%iger Sicherheit auf das Rauchen zurückgeführt werden kann, oder die Leberzirrhose mit 95%iger Wahrscheinlichkeit durch übermäßigen Alkoholgenuss oder der Herzinfarkt mit 95 % Treffsicherheit durch das Übergewicht ausgelöst wurde? 5 von 100 Patienten würden wir ungerecht behandeln, wenn wir ihre Beiträge erhöhen, weil die Kausalitätskette am Ende eben nur „mit hoher Wahrscheinlichkeit“ geschlossen ist. Was tun?

Führt eine Krankheit streng kausal zu bestimmten messbaren Symptomen, so denkt man, dass auch der Umkehrschluss von den Symptomen auf eine Krankheit eindeutig ist. Leider ist dies so nicht immer zutreffend (Abb. 3). Da gibt es zunächst eine gewisse Schwankungsbreite bei der Symptomatik, die zu einer bestimmten Krankheit gehört. Darüber hinaus führen aber auch andere Krankheiten manchmal zu ganz ähnlichen Symptomen. Diagnostik ist leider sehr oft ein „schlecht gestelltes Problem“ (ill-posed problem), wie die Mathematiker es nennen würden. Die Abbildung von der Krankheit zu den messbaren Größen ist ziemlich eindeutig, aber immer ist ein wenig Rauschen über-

lagert. Und die gemessenen Größen sind oft nicht ausreichend aussagekräftig („orthogonal“) um zwei Krankheiten zweifelsfrei zu unterscheiden. So kann ein kleiner Messfehler zu falschen Diagnosen führen.

Wie behilft sich der Arzt angesichts dieser Situation? Er richtet sich nach Leitlinien, die statistisch abgesichert sind. Und das bedeutet, er wählt die Diagnose, die am häufigsten zutreffend ist. Wenn von 100 Patienten mit ähnlicher Symptomatik 70 an der Krankheit A und 30 an der Krankheit B leiden, so behandelt er den Patienten zunächst so, als hätte er die Krankheit A. Er benutzt damit einen „Maximum Likelihood Schätzer“ (Abb. 4). Je höher die Dimension des Raumes der gemessenen Symptome und der möglichen Krankheiten ist, um so mehr empfiehlt es sich, ein Expertensystem, „Fuzzy Logic“ oder neuronale Netze, also neue Werkzeuge der computerunterstützten Diagnostik, zu Hilfe zu nehmen.

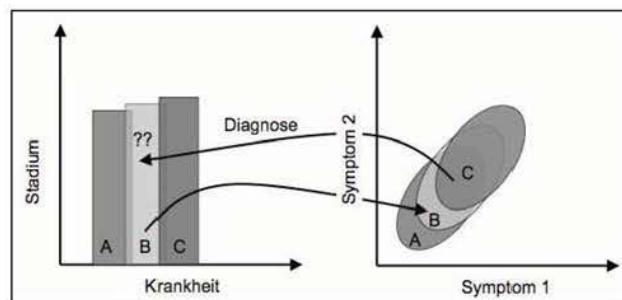


Abbildung 3

Der Schluss von den Krankheiten auf die Symptome und der Rückschluss von den Symptomen auf die Krankheiten: ein schlecht gestelltes Problem („ill-posed problem“)

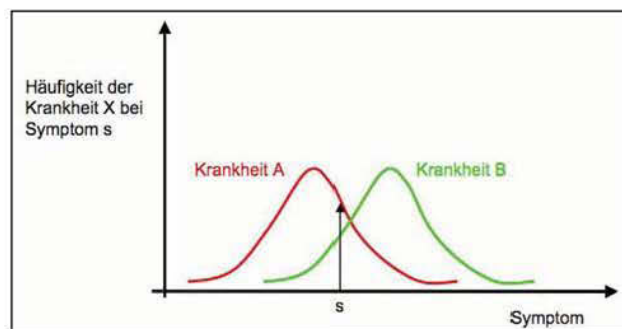


Abbildung 4

Der Maximum Likelihood Schätzer, angewendet auf die Diagnostik (hier reduziert auf eine einzige Dimension)

Leider findet man in der Medizin immer wieder ein klassisches Missverständnis zur Kausalität, wenn zwei gemessene Größen korreliert sind. Intuitiv wird die eine Größe als Ursache für die andere interpretiert. Der Cholesterin-Wert des Blutes ist eindeutig korreliert mit dem Risiko, einen Herzinfarkt zu erleiden. Ist dann aber der erhöhte Cholesterin-Wert die Ursache für den Herzinfarkt? Ist ein Medikament, welches den Cholesterin-Wert senkt, automatisch ein sinnvolles Therapeutikum? Bei näherem Hinsehen sind natürlich mehrere Interpretationen bei einer Korrelation zwischen den Größen A und B möglich:

- A ist Ursache von B,
- B ist Ursache von A,
- A und B sind Folge von C,
- A und B sind nur zufällig korreliert.

Die ersten drei Interpretationen deuten auf einen kausalen Zusammenhang hin, die letzte ist nur Zufall.

Therapieplanung basiert auf dem Axiom, dass der Heilerfolg kausal nach einer Therapiemaßnahme eintritt. Als im ersten Teil dieses Artikels von der Berechenbarkeit des physiologischen Systems „Mensch“ die Rede war, haben möglicherweise noch viele Leser gemeint, dieser Ansatz wäre völlig überzogen, eine solche Berechenbarkeit sei wegen der Komplexität des Systems ganz unmöglich. Nun erkennen wir, dass Therapieplanung ohne diese Annahme – so schlecht sie auch begründet ist – unmöglich ist.

Wie bei allen komplexen dynamischen Systemen gilt auch hier: Je genauer die Anfangsbedingungen des Systems bekannt sind und je genauer das mathematische Modell das reale System beschreibt, desto besser wird die Therapie. Die genaue Kenntnis der Anfangsbedingungen erfordert eine genaue Diagnostik, meistens mit Hilfe der Medizintechnik. Nicht sinnvoll ist es, so viele Größen wie möglich zu messen. Besser ist es, diejenigen Größen zu messen, die einen guten Rückschluss auf die entscheidenden Zustandsvariablen erlauben (siehe Diagnostik und das „schlecht gestellte Problem“). Die genaue mathematische Beschreibung des Modells erfordert eine mühevoll und langwierige Arbeit in der neuen Wissenschaft, die sich „mathematische Physiologie“ nennt, insbesondere in der Erweiterung auf die „mathematische Pathophysiologie“. Im weltumspannenden „Physiome-Project“ (www.physiome.org) tauschen Wissenschaftler ihre Ergebnisse aus. Am Ende wird es nicht nur das „Standard-Modell“ des „Standard-Patienten“ geben. Es wird individuelle Patienten-Modelle geben, in denen beispielsweise die genetischen Dispositionen eingearbeitet sind. Die „personalized medicine“ beginnt schon heute, diesen Weg zu gehen.

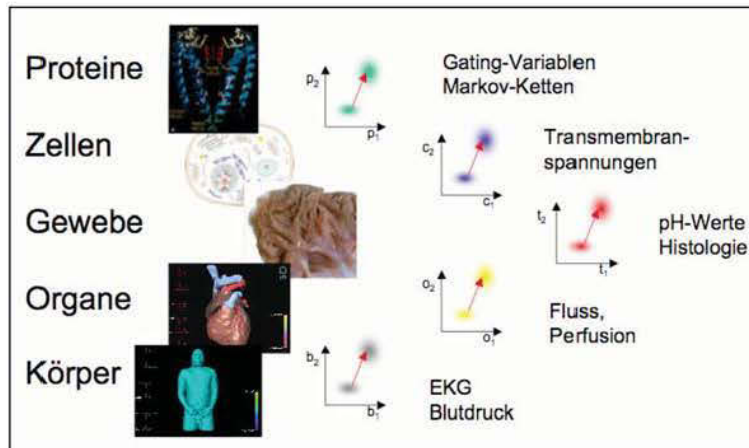


Abbildung 5
 Teilsysteme mit ihren jeweiligen Zustandsvariablen erstrecken sich über viele Dekaden: vom Nanometer-Maßstab bis zur Meter-Skala.

Hierbei sollen zentrale Probleme nicht verschwiegen werden: Die Abgrenzung von Teilsystemen, die für sich betrachtet und eigenständig gelöst werden können, ist schwierig. Ein Kreislaufmodell, in dem Blutdruck und Blutfluss in den Gefäßen mathematisch beschrieben wird, ist verzahnt mit einem Nieren-Modell, in dem zum Beispiel der Elektrolyt-Haushalt des Menschen dargestellt wird. Außerdem erstreckt sich eine geeignete mathematische Beschreibung der Physiologie des Menschen oft über viele Dekaden: vom Nanometer-Maßstab der Ionenkanäle bis zum Meter-Maßstab des ganzen Körpers, oder von der Mikrosekunden-Skala des Aktionspotentials an Nerven bis zur Sekunden-Skala des Herzschlags (Abb. 5). Es handelt sich um typische Multiskalenprobleme.

Es wäre eine Illusion, zu meinen, die Therapie wäre dann in Zukunft streng kausal, berechenbar, optimierbar und würde immer mit 100 % Wahrscheinlichkeit zum Erfolg führen. Wie bereits erwähnt, hängt der genaue Verlauf der Trajektorie komplexer nicht-linearer Systeme oft entscheidend von der ganz genauen Kenntnis der Anfangsbedingungen und der Modellparameter ab. Schon infinitesimal kleine Abweichungen können in eine ganz andere Richtung führen.

Wegen der daraus resultierenden hohen stochastischen Komponente werden wir auch in Zukunft nicht ganz ohne schwierige Entscheidungen auskommen. Hier ein Beispiel: Eine Krankheit führt in 90 % aller Fälle zum Tod. Die einzige bekannte therapeutische Maßnahme führt in 20 % aller Fälle zum Erfolg und in 80 % aller Fälle zum Tod. Was

tun? Die Maßnahme durchführen und damit möglicherweise den Patienten töten, oder passiv auf Spontanheilung hoffen, also auf eine unwahrscheinliche aber doch prinzipiell mögliche Variante?

Betrachten wir zum Schluss noch einmal das Kalman-Modell (Abb. 1): Aus den vorauschten Messgrößen wie Temperatur, Blutdruck, Blut-Sauerstoffsättigung, EKG, etc. versuchen wir so gut wie möglich die Zustandsvariablen zu bestimmen. Aus der Grundlagenforschung erhalten wir ein möglichst genaues Modell der Physiologie des Menschen. Damit können wir den nächst folgenden Zustand des Systems vorhersagen. Daraus berechnen wir Messgrößen, die wir messen müssten, wenn unser Modell richtig wäre. Jede Abweichung von der Realität können wir verwenden, um unser Modell oder die Zustandsvariablen zu verbessern. Wir werden nach kleinen Stößen auf das System deren Antwort beobachten und mit der Vorhersage vergleichen – eine typische Vorgehensweise in den Ingenieurwissenschaften („Impulsantwort“). Am Ende können wir den großen Blick in die Zukunft wagen: wird das System „Mensch“ stabil und gesund bleiben oder werden die Zustandsvariablen kausal in einen Bereich laufen, der für den Menschen unangenehm oder sogar tödlich ist (Abb. 6)? Wenn der Patient mit großer Wahrscheinlichkeit krank wird, sollten wir mit Steuergrößen eingreifen. Medikamente, aktive Implantate, chirurgische Interventionen werden so geplant, dass sie kausal das System Mensch wieder in den „grünen Bereich“ fahren, und dabei so wenig unangenehme Nebenwirkungen hervorrufen wie möglich. Ein Traum? Ja, aber ein Traum, dem wir immer näher kommen werden.

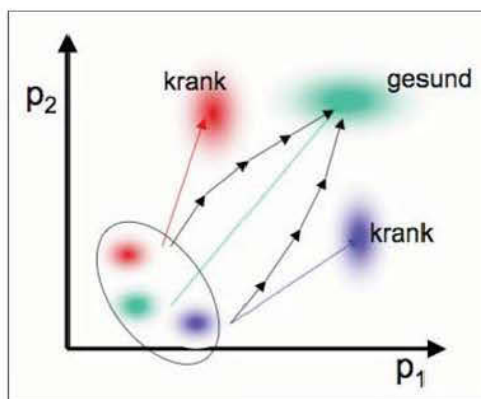


Abbildung 6
Trajektorien im Zustandsraum, die in den gesunden und in den kranken Bereich führen, und der Versuch, die Trajektorien mit der Therapie zu beeinflussen

In diesem Bild kann auch die zu Beginn ausgeklammerte psychische oder psychosomatische Komponente mit gewissen Einschränkungen wieder integriert werden. Manchmal wird die Psyche des Patienten eine mehr oder weniger versteckte Komponente des Modells selber sein. Führt sie die Trajektorie des Systems in den Zustand der Krankheit, so muss versucht werden, sie durch therapeutische Maßnahmen auf einen anderen Pfad zu lenken. In gewisser Weise kann die Psyche oder die Ratio aber auch Teil der Steuerung des Systems sein. Das Vertrauen in den Arzt und den Therapieerfolg kann die Trajektorie schneller oder sicherer in den gesunden Bereich zurückführen, bis hin zum reinen Placebo-Effekt. Dies ist einmal ein ganz anderer Blick auf die uralte Leib-Seele-Problematik.

Die Kernaussagen dieses Artikels sind:

- Wir können in der mathematischen Physiologie den Menschen als komplexes dynamisches System auffassen, welches durch Zustandsvariablen und ein mathematisches Modell beschrieben werden kann. Die Zukunft folgt hierbei kausal aus der Vergangenheit.
- Diagnostik bedeutet, die Zustandsvariablen und Modellparameter so vollständig und so genau wie möglich zu bestimmen. So entsteht ein individuelles Patientenmodell. Leider können wir viele Größen nur ungenau schätzen.
- Damit wird eine Vorhersage möglich (Kausalität), aber es sind meistens nur Wahrscheinlichkeitsaussagen. Die physiologische Zukunft eines Lebewesens ist nie exakt vorhersagbar, aber wir wissen manchmal „ziemlich genau“ was passieren wird.
- Therapieplanung geht schon immer von einer kausalen Kette aus. Je genauer das Patientenmodell, desto höher die Erfolgswahrscheinlichkeit. Eine Erfolgsgarantie wird es aber nicht geben.
- Dies wirft eine Reihe von ethischen Problemen auf, die wir mit Hilfe der computer-assistierten Diagnostik und Therapieplanung abschwächen aber nicht lösen können.

Reinhard F. Hüttl

Die „neuartigen Waldschäden“ – ein Fallbeispiel zur Kausalitätsfrage

Hintergrund

Die Beeinflussung der Umwelt durch anthropogene Stoffeinträge stellt Probleme von großer Komplexität dar. Boden, Wasser und Luft sind lokal, regional und gelegentlich überregional durch eine Vielzahl potentiell toxischer Stoffe verändert, die einzeln oder in additiver beziehungsweise synergistischer Kombination negative Auswirkung auf die Ökosysteme haben.

Obschon gerade in den letzten Jahrzehnten das Interesse an den Wirkungen von Luftschadstoffen groß war und insbesondere mit Bezug auf CO₂ auch heute noch ist, wurde bereits seit langem Besorgnis, zum Beispiel über die Schädigung der Bäume und Wälder durch Luftschadstoffe geäußert. Zunächst standen bei der Betrachtung dieser Problematik lokale Rauchschäden im Vordergrund, die direkt von Nahemittenten verursacht wurden. Die wesentlichen Luftschadstoffe waren in diesem Zusammenhang Schwefeldioxid und Stäube. Mit zunehmender Industrialisierung stieg die Verbrennung fossiler Ressourcen an. Dieser Umstand sowie die weiträumige Verteilung von luftgetragenen Schadstoffen als Folge der „Politik der hohen Schornsteine“ in den 1970er Jahren haben dazu geführt, dass die Beeinflussung der Wälder durch Luftschadstoffe auch in emittententfernen Regionen zunächst zunahm. Die in diesem Zusammenhang beobachteten Waldschäden wurden als „neuartige Waldschäden“ bezeichnet. In der öffentlichen Debatte wurde dieses Phänomen häufig als Waldsterben adressiert.

Dokumentation

Unter dem Begriff „neuartige Waldschäden“ wird eine Reihe von Schadensmerkmalen verstanden, die bei verschiedenen Baumarten auf den unterschiedlichsten Standorten seit Mitte der 1970er Jahre, vermehrt aber seit Beginn der 1980er Jahre beobachtet wurden, sich meist rasch ausbreiteten und großflächig anzutreffen waren. Weithin wurden diese

Waldschäden mit den negativen Wirkungen von Luftschadstoffen in kausalen Zusammenhang gebracht.

Der Gesundheitszustand von Waldbäumen und -beständen wird aber von einer Vielzahl von Faktoren bestimmt. Dazu zählen der chemische, physikalische und biologische Bodenzustand, die Wasserversorgung, das Klima, Witterungsbedingungen, Nutzungsgeschichtliche Einflüsse, Insekten und Pilzinfektionen sowie in der Tat standortspezifische Depositionsregime. Die Nährelementversorgung stellt dabei ein zentrales Beurteilungskriterium dar. Gut ernährte Bäume sind gegenüber von außen auf das Ökosystem Wald einwirkende Stressoren widerstandsfähiger als weniger vitale Bäume.

Die Untersuchung der „neuartigen Waldschäden“ war deshalb von Anfang an auf die möglichst exakte Erfassung des Gesundheitszustandes erkrankter Bäume gerichtet. Bei Betrachtung des gesamten Waldökosystems ist unter Gesundheit (Vitalität) die Fähigkeit zu verstehen, dauerhaft negativen Umwelteinwirkungen zu widerstehen und dabei stabil und produktiv zu bleiben. Ein guter Ernährungszustand ist somit eine notwendige Voraussetzung für einen guten Gesundheitszustand. Entsprechend wurden bei den großflächig auftretenden „neuartigen Waldschäden“ schon bald Belege für akute Ernährungsstörungen gefunden. Von besonderer Bedeutung war dabei das in der Pflanze bewegliche Magnesiumion. Auch die Elemente Kalium, Calcium, Phosphor, Zink und Mangan spielten gelegentlich eine wichtige Rolle. Aufgrund der Immissionsbelastungen sind bzw. waren zudem die Nährelemente Schwefel und Stickstoff von Interesse.

Nach dem „Tannensterben“ im Bayerischen Wald sowie im Schwarzwald folgten schon bald Schäden bei Fichte und Kiefer. Seit etwa Mitte der 1980er Jahre traten verstärkt Schäden in Buchenbeständen auf. Seit Ende der 1980er Jahre wurde zudem von einem neuen Eichensterben berichtet. Seit Beginn dieses Jahrzehnts wurden wiederum verstärkt Schäden an bestimmten Buchenbeständen beobachtet.

Erste stichprobenartige Erhebungen in den Jahren 1982 und 1983 zeigten eine rasche Zunahme der Schäden. 1984 wurden erstmalig in allen Bundesländern statistisch repräsentative Waldschadensinventuren nach einheitlichen Kriterien durchgeführt. Zur Bestimmung der Schadanteile wurden und werden so genannte Nadel- bzw. Blattverluste und Verfärbungssymptome als maßgebliche Kriterien herangezogen. Die Erhebung von 1984 zeigte, dass rund 50 % der deutschen Waldfläche Schäden aufwies. Auch die Ergebnisse der weiteren Inventuren erbrachten zunächst Gesamtschäden von etwa dieser Größenordnung. In den letzten Jahren nahmen die Schadensanteile teilweise deutlich ab, um aber gerade in bzw. nach Trockenjahren (z. B. 2003) wieder stark anzusteigen.

Von Anfang an war jedoch augenfällig, dass bei der Bewertung der Waldschäden getrennt nach Baumarten, Alter und Schadstufen sich mit Bezug auf die Entwicklung der Schäden mitunter deutliche räumliche und zeitliche Differenzierungen ergaben. Ganz besonders schwankten die jährlichen Schadenssituationen, wenn die Waldschäden getrennt nach Bundesländern betrachtet wurden.

Die jeweils im Sommer durchgeführten Inventuren basieren auf einem 4 x 4 oder 8 x 8 km Stichprobenraster. An jedem Inventurpunkt wird eine bestimmte Anzahl von Bäumen okular vom Boden aus im Hinblick auf Nadel- und Blattverluste sowie Nadel- und Blattverfärbungssymptome begutachtet. Da Verfärbungserscheinungen häufig nur auf den Oberseiten der Nadeln/Blätter auftreten und sich damit dem Blickfeld des Beobachters entziehen, dient zur Beurteilung des Ausmaßes und der Verteilung der Schäden fast ausschließlich das Merkmal Nadel-/Blattverlust.

Methodenkritik

Die in Deutschland praktizierten Waldschadens- bzw. Waldzustanderhebungen wurden von Anfang an kontrovers diskutiert. Bei der Erfassung des Parameters Nadel-/Blattverlust geht man nämlich von einem „normalen“ Benadelungs- bzw. Belaubungszustand aus. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zum einen die Benadelung bzw. Belaubung der Bäume im gesunden Zustand, also vor einer Schädigung, nicht bekannt ist. Zum anderen kann man zum Beispiel bei Nadelhölzern auch bei gesunden Bäumen kein bestimmtes Höchstalter der Nadeln und damit keinen „normalen“ Benadelungszustand unterstellen. Die Anzahl der lebenden Nadeljahrgänge variiert je nach Standort und genetischer Veranlagung. Zudem hat die standortspezifische Ernährungssituation einen Einfluss auf diesen Parameter, dies gilt auch für die Wasserversorgung. Weiterhin wurde gezeigt, dass Kronenverlichtungen gerade bei Nadelbäumen auch Ausdruck der sozialen Differenzierung der Bäume sein können. Auch stärkere Beschattung, Wind, Schnee, Frost, Hitze, Eis, Insekten und Pilzbefall sowie eine Reihe weiterer Faktoren können Kronenverlichtungen hervorrufen. Die Benadelung bzw. Belaubung gesunder Bäume weist demnach eine erhebliche Schwankungsbreite auf. Gleichwohl ist unbestritten, dass auch Luftschadstoffe zu Blatt- und Nadelverlusten führen können. Somit stand von Anfang an fest, dass der Parameter Nadel-/Blattverlust unspezifisch und damit zur Bestimmung spezifischer Ursachen völlig ungeeignet ist.

Andererseits lassen sich zur optischen Diagnose ernährungsbedingter Waldschäden spezifische Verfärbungssymptome nutzen. Diese sind zum Beispiel für Magnesiummangel ausführlich beschrieben. Zur exakten Beurteilung des Ernährungszustandes ist die Blatt- bzw. Nadelanalyse das Mittel der Wahl. Für zahlreiche Baumarten liegen hinreichend gesicherte Grenzwerte bzw. Grenzbereiche vor. Die mit Ernährungsstörungen gekoppelten Waldschäden ließen sich damit in Abhängigkeit von Standortfaktoren und Bestandesbedingungen in spezifische Schadtypen einteilen bzw. diesen zuordnen.

Gerade das Magnesiummangelsyndrom, das optisch seit Mitte der 1970er Jahre vor allem in höheren Lagen der Mittelgebirge, insbesondere an Fichte aber auch an anderen Baumarten dominierte, hat sich aus ernährungkundlicher Sicht erst allmählich entwickelt. Das relativ plötzliche weitverteilte Auftreten der sichtbaren Symptome dieser Erkrankung seit Beginn der 1980er Jahre lässt sich am ehesten mit extremen Witterungsbedingungen wie den häufigen Trockenperioden Ende der 1970er, Anfang der 1980er Jahre erklären. Die seit Mitte der 1980er Jahre beobachteten Stagnationen im Vergilbungsfortschritt sowie die verbreitete natürliche Regeneration bis hin zum völligen Verschwinden dieser Symptome in den relevanten Waldbeständen fielen mit Jahren günstigerer Niederschlagsverhältnisse zusammen.

Grundsätzlich erhebt sich ohnehin die Frage, ob der Parameter Nadel-/Blattverlust überhaupt genutzt werden kann, den Grad der Schädigung von Waldbäumen und -beständen anzugeben. Wenn man davon ausgeht, dass geschädigte Bäume ihr Wachstum reduzieren, dann sollte eine Korrelation zwischen Nadel- bzw. Blattverlust und Wachstumsparametern gegeben sein. Für die Fichte besteht eine derartige Beziehung nicht immer. Erst bei Nadelverlusten von mehr als 40–50 % kann der Volumenzuwachs signifikant reduziert sein. Bei Fichtenbeständen mit Nadelverlusten unter 50 % waren in Baden-Württemberg während der letzten Jahrzehnte häufig überraschende Mehrzuwächse festzustellen. Auch in bayerischen Fichtenbeständen mit Nadelverlusten von mehr als 60 % konnten keine Zuwachsminderungen gezeigt werden. Dieser zunächst widersprüchlich erscheinende Befund lässt sich vor allem damit erklären, dass es sich bei den beobachteten Nadelverlusten jeweils um die älteren, mehr oder weniger unproduktiven Assimilationsorgane handelt. Daraus kann gefolgert werden, dass verschiedene Koniferenarten, wie zum Beispiel Fichten, eine über den eigentlichen physiologischen Bedarf hinausgehende Produktion bzw. Retention der Nadelbiomasse betreiben. Es ist deshalb nicht unwahrscheinlich, dass Nadelabwürfe, die unter Stressbedingungen hormonell gesteuert erfolgen, nicht notwendigerweise zu Wachstumsdepressionen führen müssen.

Auch im Rahmen der skandinavischen Waldschadensinventuren wurde der Einfluss verschiedener natürlicher Stressfaktoren auf die Nadelmasse von Koniferen untersucht. Denn in Schweden, wie auch in Norwegen nehmen die Nadelverluste entgegen der Konzentrationsgradienten der relevanten Luftschadstoffe von Süden nach Norden zu. In Schweden, aber auch in Norwegen konnte die geringere Benadelung im Norden auf ungünstigere Standortbedingungen, insbesondere das Klima, zurückgeführt werden.

Auch die mitunter beträchtlichen regionalen Schwankungen der Ergebnisse der jährlichen Waldschadensinventuren in Zentraleuropa weisen auf natürliche Faktoren als Auslöser dieser Veränderungen hin. In diesem Zusammenhang darf nicht außer Acht bleiben, dass aufgrund von ausgeprägter Trockenheit oder starkem Frost bereits früher dramatische Kronenverlichtungen aufgetreten waren, wie dies sehr anschaulich mit Hilfe von Vergleichsfotografien oder mittels kontinuierlicher Beobachtungen demonstriert werden konnte.

Das Symptom Nadel-/Blattverlust bzw. Kronenverlichtung ist somit weder als neuartig noch als wissenschaftlich brauchbarer Parameter zur Charakterisierung des Vitalitätszustandes der Waldbäume bzw. -bestände anzusehen. Auch als Indiz für die negative Einwirkung von Luftschadstoffen ist dieses Kriterium ungeeignet, und zwar auch deshalb, weil abiotische Blatt- und Nadelverluste bis hin zu flächigen Absterbeerscheinungen in Waldgebieten existieren, die nicht durch Luftschadstoffe beeinflusst sind, so zum Beispiel auf Hawaii oder in Neuseeland.

Erklärungsansätze

Ohne an dieser Stelle auf die weit über hundert formulierten Arbeitshypothesen zur Erklärung der Waldschadensproblematik im Detail einzugehen, ist festzuhalten, dass die anthropogene Beeinflussung der Atmosphäre und die daraus resultierenden Stoffeinträge als Standortfaktoren für die jeweiligen Waldbestände zu bewerten sind, wobei Veränderungen der Immissionen in Raum und Zeit sowie nach Art, Form, Menge und Verhältnis zu berücksichtigen sind.

Es wurde diesbezüglich ein Erklärungsansatz formuliert und erfolgreich getestet, in dem die standort- und bestandesspezifischen ernährungsbedingten Waldschäden als Folge verschiedenartiger Kombinationen multipler Stressfaktoren betrachtet werden. Dabei spielt das häufig schwache Nährelementangebot der Waldstandorte, das durch vielfältige menschliche Einflüsse (Nutzungsgeschichte) mitverursacht wurde, die entscheidende Rolle.

Extern verstärkte Bodenversauerung (z. B. durch „sauren Regen“), Verarmung an basischen Kationen (z. B. als Folge von Ernteentzügen über lange Zeiten hinweg), erhöhte Stickstoff-Einträge (teilweise verursacht durch menschliche Aktivitäten), reduzierte atmosphärische Magnesium- und Kalziumdepositionen, das heißt verringerte Staubeinträge (die rasch mit Hilfe von Luftreinigungmaßnahmen erzielt worden waren) sind ökosystemare Prozesse, die diese Situation örtlich verschärfen und als mitwirkende Faktoren einzustufen sind.

Extreme Witterungsbedingungen insbesondere Trockenheiten besitzen sowohl auslösenden als auch mitwirkenden Charakter.

Biotische Erkrankungen werden als Folgewirkungen eingestuft.

Da die Konstellation der Kausalfaktoren in der Regel komplex ist, sich diese Einflüsse zumindest partiell gegenseitig bedingen, verstärken oder kompensieren und zudem standortspezifisch sind, können die jeweiligen Schadursachen nur am Standort selbst bestimmt werden. Globale Erklärungsansätze waren und sind deshalb wenig sinnvoll.

Wie oben bereits beschrieben, wurden in Deutschland, in zahlreichen europäischen Ländern sowie auch in Nordamerika in geschädigten Waldbeständen Magnesium-Mangelerscheinungen weit verbreitet angetroffen und in der Regel in kausalem Zusammenhang mit Immissionseinwirkungen diskutiert. Akuter Magnesium-Mangel kam zeitgleich aber auch in Waldgebieten ohne nennenswerte Immissionseinflüsse, wie zum Beispiel bei Kiefern in verschiedenen Regionen Neuseelands vor. In Neuseeland konnten diese Mangelerscheinungen bei den insgesamt schnellwüchsigen Kiefern durch bodenbürtige Magnesium-Unterversorgung erklärt werden.

Aufgrund dieses Befundes stellt sich zwangsläufig die Frage, warum der Magnesium-Mangel in deutschen, europäischen und nordamerikanischen und damit in mehr oder weniger stark immissionsbeeinflussten Waldgebieten nicht ebenso wie im praktisch immissionsfreien Norden von Neuseeland als standörtliches, insbesondere bodenbürtiges Problem anzusehen ist. Immissionseinflüsse wären aus dieser Sicht allenfalls als mitwirkende Faktoren einzustufen. Die auslösende Ursache sichtbarer Symptome wäre dann vor allem auf Witterungsextreme, insbesondere Trockenheiten zurückzuführen.

Die Waldökosysteme Europas und Nordamerikas sind bei natürlichen Stickstoff-Eintragsraten überwiegend durch Stickstoff-Mangelsituationen gekennzeichnet. Die bereits seit längerem andauernden Stickstoff-Einträge können zur Steigerung der Primärproduktion beitragen. Mitte der 1980er Jahre wurden zunächst in Süddeutschland mit Hilfe detaillierter und umfassender ertragskundlicher Erhebungen deutliche Mehrzuwächse insbesondere bei Fichte im Vergleich mit den Ertragstabellen oder anderen Referenzdaten

festgestellt, die bereits Mitte der 1960er Jahre eingesetzt hatten. Ähnliche Ergebnisse wurden für Fichte und Tanne aus der Schweiz und Frankreich vorgelegt. Selbst in Südfinnland und Südnorwegen mit vergleichsweise geringen Stickstoff-Einträgen wurden seit Anfang der 1960er Jahre jährliche Volumenzuwachsstörungen bei Fichte gemessen.

Als Ursache dieser inzwischen für viele europäische Länder nachgewiesenen Zuwachsstörungen, die belegen, dass der Holzvorrat in diesen Ländern seit Anfang der 1950er Jahre insgesamt um mehr als 40 % angestiegen ist, wurden neben regional verbesserten Witterungsbedingungen (erhöhte Temperaturen und Niederschläge) und intensiverer Forstwirtschaft auch die erhöhten Stickstoff-Einträge und die gestiegene CO₂-Konzentration in der Atmosphäre genannt.

Folgerungen

Auch wenn sich die Wälder in Deutschland, aber auch in ganz Europa, derzeit in einer an sich völlig unerwarteten Gesundungsphase mit bisher unbekanntem Holzzuwachsraten befinden, kann dieser per se positive Befund nicht darüber hinweg täuschen, dass es sich bei unseren Wäldern weithin um von Menschen geschaffene Forste handelt, die ständiger forstlicher Pflege bedürfen.

Die in vielen Regionen Deutschlands vom Altersklassenaufbau geprägten Reinbestände von Nadelgehölzen (insbesondere Fichte sowie Kiefer) stehen deshalb seit Jahrzehnten in der Kritik. Die Absicht, die bestehenden Wälder umzubauen, das heißt in natürlich strukturierte Waldökosysteme mit möglichst naturnahen Baumartenzusammensetzungen zu überführen, wird dabei inzwischen von einem breiten Konsens getragen. Mit dem Waldumbau wird das Umweltqualitätsziel naturnaher, stabiler und standortgerechter Wälder verfolgt. Inzwischen sind in vielen Regionen Deutschlands, aber auch in einer Reihe europäischer Staaten Waldumbauprogramme erfolgreich angelaufen.

Kaum verständlich ist jedoch, dass die Waldschadenserhebungen nach wie vor auf der Grundlage einer wissenschaftlich nicht haltbaren Methode praktiziert und damit der Öffentlichkeit jährlich eine Waldschadens- bzw. Waldzustandsstatistik vorgelegt wird, die dem wirklichen Waldzustand nicht realistisch beschreibt. Nach ELLENBERG, dem großen deutschen Geobotaniker, war die beängstigende Ausdehnung „neuartiger Waldschäden“ in Deutschland und in Europa zu einem beträchtlichen Teil ein Konstrukt, das durch Anwendung einheitlicher Schätzhilfen auf standörtlich unterschiedlichen Waldflächen und in witterungsmäßig ungleichen Jahren zustande kam bzw. immer wieder kommt.

Andererseits ist erfreulich, dass die seit Anfang der 1980er Jahre mit Hilfe zahlreicher Modellberechnungen prognostizierten großflächigen Waldschäden bis hin zum Absterben ganzer Waldgebiete – also das Waldsterben schlechthin – nicht eingetreten und nach ULRICH, dem Begründer dieser Debatte, in absehbarer Zukunft auch nicht zu erwarten ist.

Fazit

Das Fallbeispiel „neuartige Waldschäden“, das in Deutschland die öffentliche, politische und fachliche Umweltdiskussion über fast zwei Jahrzehnte dominierte, zeigt, welche Schiefelage in Gesellschaft und Politik, aber auch in der Wissenschaft erzeugt werden kann, wenn im naturwissenschaftlichen Bereich das Kausalitätsprinzip, das heißt belegte und damit reproduzierbare Ursache-Wirkungsbeziehungen nicht adäquat berücksichtigt werden.

Hätte man sich in der gesellschaftlichen, politischen, aber insbesondere in der wissenschaftlichen Debatte nicht so sehr von einseitigen Arbeitshypothesen – und damit vermeintlichen Kausalitäten – leiten lassen und bei deren Diskussion von Anfang an profunde Beobachtungen wie zum Beispiel weithin signifikant erhöhte Zuwachsraten, die so gar nicht in das Waldsterbenszenario passten, ignoriert, hätte man schon viel früher ein wesentlich objektiveres Bild zeichnen und damit Maßnahmen auf den Weg bringen können, die geeignet gewesen wären, die wirklichen Probleme möglichst rasch zu lösen. Bei diesen Maßnahmen handelt es sich beispielsweise um den erst verspätet begonnenen Waldumbau, das heißt die Überführung von bestimmten Reinbeständen auf bestimmten Flächen in reicher strukturierte Mischbestände mit einhergehender Förderung des Laubholzanteils, den Umbau nicht standortgerechter in standortgerechte Bestände und eine verbesserte Bestandespflege einschließlich der Minderung von Durchforstungsrückständen.

Andererseits wäre schon viel früher zu erkennen gewesen, dass Veränderungen des Klimas wie erhöhte Temperaturen und damit zum Beispiel verlängerte Vegetationszeiten, aber auch zum Teil erhöhte Niederschläge und insbesondere die angestiegenen CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre, in der Verbindung mit weithin erhöhten Stickstoffeinträgen bzw. mit verbesserter Stickstoffverfügbarkeit aufgrund der bereits erfolgten klimatischen Veränderungen zu insgesamt günstigeren Waldwachstumsbedingungen führen würden.

Aus heutiger Sicht sind die tatsächlich beobachteten „neuartigen Waldschäden“ wesentlich stärker klimatisch und durch langzeitiges forstliches Handeln verursacht als durch Luftschadstoffe. Gleichwohl war (und ist) die Verminderung der Luftschadstoffe eine richtige Umweltschutzmaßnahme, die jedoch mit Zielsetzungen wie Bodenschutz, Gewässerschutz, Naturschutz, Abwendung menschlicher Gesundheitsbeeinträchtigungen oder auch mit Gebäudeschutz viel sinnvoller zu begründen gewesen wäre, als mit dem „Konstrukt“ Waldsterben.

Aktuell fügt es sich jedoch gut, dass der Holzvorrat unserer Wälder viel größer ist, als zunächst prognostiziert. Denn Holz ist ein wichtiger natürlicher und nachwachsender Rohstoff, der heute neben der konventionellen Holznutzung auch für den Ersatz fossiler Rohstoffe in möglichst großen Mengen benötigt wird. Es fügt sich des Weiteren gut, dass das Waldwachstum nach wie vor schneller erfolgt als erwartet, denn in dieser Biomasse werden größere Mengen des so genannten Treibhausgases CO₂ zumindest temporär immobilisiert. Somit ist der Wald nicht mehr „sterbender Patient“, sondern „viel versprechender Hoffnungsträger“. Die deutsche Forst- und Holzwirtschaft hat aus heutiger Sicht eine sehr gute ökonomische Perspektive. Die forstwissenschaftlichen Fakultäten können sich der Studierendennachfragen kaum erwehren, und schon wird damit begonnen, bislang landwirtschaftlich genutzte Flächen im großen Stile aufzuforsten.

Dieter Mewes

Beispiele aus der Verfahrenstechnik zum Erläutern des Kausalitätsbegriffs

Ingenieure, Chemiker, Physiker und Biologen, die mit dem Lösen verfahrenstechnischer Aufgaben betraut sind, stellen neue Produkte durch chemische, physikalische oder biologische Umwandlungsprozesse her. Die eingesetzten Arbeitsmethoden basieren auf den Grundgesetzen der Naturwissenschaften, welche zum Erkennen kausaler Zusammenhänge genutzt werden. Auf diese Weise lassen sich zwischen den in der Praxis vorliegenden Parametern unter Anwendung einer mehr oder weniger detaillierten Modellbildung vielfältige Zusammenhänge formulieren. Sie führen produktspezifisch zur Entwicklung neuartiger Prozesse und zu geeignet dimensionierten Anlagen. Letztere werden gebaut und betrieben. Häufig bestehen die Anlagen aus einer Vielzahl von Apparaten, welche je nach den in ihnen ablaufenden Umwandlungsprozessen und den verarbeiteten Stoffen neu entwickelt, in jedem Falle jedoch dimensioniert werden müssen. Die Produkte selbst können fest, flüssig oder gasförmig bzw. je nach Phase in partikelförmiger oder in kontinuierlicher Form vorliegen. Beispiele hierfür sind fast alle Dinge, mit denen wir im täglichen Leben in Berührung kommen, und die es uns ermöglichen, ein an unsere Umgebung angepasstes Leben zu führen:

- Nahrungsmittel, Pharmazeutika, Textilien, Kosmetika
- Kraftstoffe, petrochemische Produkte
- Düngemittel, Lacke, Baustoffe
- v. a. m.

Im Folgenden sollen einige vom Ingenieur in den Arbeitsgebieten

- Forschung und Entwicklung,
- Dimensionierung und Bau von Anlagen und
- Betrieb von Anlagen

eingesetzte Arbeitsmethoden, welche durch das Anwenden kausaler Zusammenhänge gekennzeichnet sind, erläutert werden. Hierzu dienen drei ausgewählte Beispiele. Diese betreffen das Erarbeiten neuer physikalischer Grundlagen zum Vorhersagen des Misch-

prozesses in chemischen Reaktoren zum Zwecke der Maßstabsvergrößerung, das Dimensionieren von Blasensäulen sowie die Analyse einer Betriebsstörung im Ablauf der Produktion von Siliziumtetrachlorid.

1 Visualisieren des Mischprozesses zum Zwecke der Maßstabsvergrößerung chemischer Reaktoren

In der chemischen Industrie stellen Mischvorgänge, die besonders häufig chemischen Reaktionen vorangehen, einen zentralen Verfahrensschritt der meisten Prozesse dar. Sie werden in der Mehrzahl der Fälle in Behältern durchgeführt, die mit mechanisch bewegten Rührern unterschiedlicher Form ausgerüstet sind. Um darin chemische Reaktionen ablaufen zu lassen, ist es notwendig, die eingesetzten Stoffe nicht nur makroskopisch durch Segregation, sondern möglichst rasch miteinander so zu vermischen, dass auch im molekularen Ortsmaßstab keine Unterschiede der Konzentrationen mehr feststellbar sind. Erfolgt die Vermischung zu langsam, so kann dies das unerwünschte Entstehen von Nebenprodukten zur Folge haben.

Derartige Reaktionsabläufe lassen sich mit einer Modellvorstellung vorhersagen, welche die kausalen Zusammenhänge zwischen den im makroskopischen Ortsmaßstab beobachtbaren und messbaren physikalischen Parametern mit den im mikroskopischen, das heißt im molekularen Ortsmaßstab ablaufenden Zusammenhängen korreliert. Wobei letztere nur indirekt der Messung zugänglich sind.

Das Mischen läuft im Rührgefäß in zwei Stufen ab, die man als Makro- und Mikro-mischen bezeichnet. Für laminare Strömungsfelder ist dieser Vorgang schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

Während des konvektiven Transports formen die zu vermischenden Stoffe im Behälter zunächst einzelne Lamellen mit einheitlichen Konzentrationen, die den Ausgangswerten entsprechen. Man bezeichnet diesen Vorgang als Segregation. Die Lamellen werden mit zunehmender Mischdauer immer dünner und länger, bis ihre Dickenabmessungen so gering werden, dass die Diffusion zwischen den Lamellen zum Konzentrationsausgleich mit der Umgebung führt. Dann spricht man vom Mikromischen.

Um auf experimentellem Wege die Makro- und die Mikrovermischung auf getrennten Wegen zu visualisieren, wird in das Rührgefäß die geringe Menge einer Mischung aus zwei Farbstoffen eingebracht: ein inerte Farbstoff und einer, der sich im Verlauf des Mischvorgangs durch eine chemische Reaktion entfärbt. Die Makromischzeit ist die Zeit,

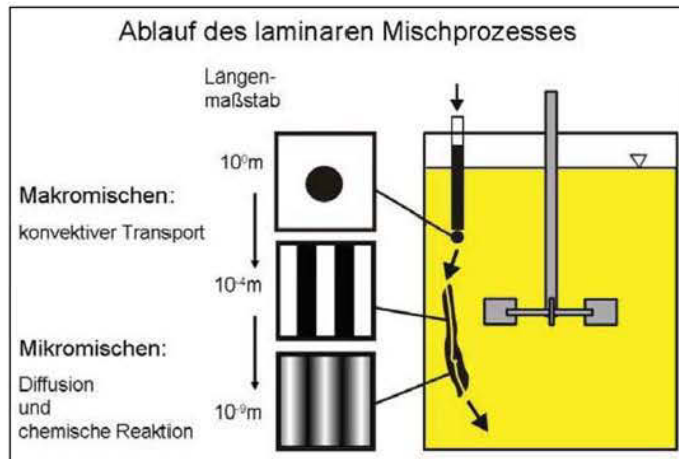


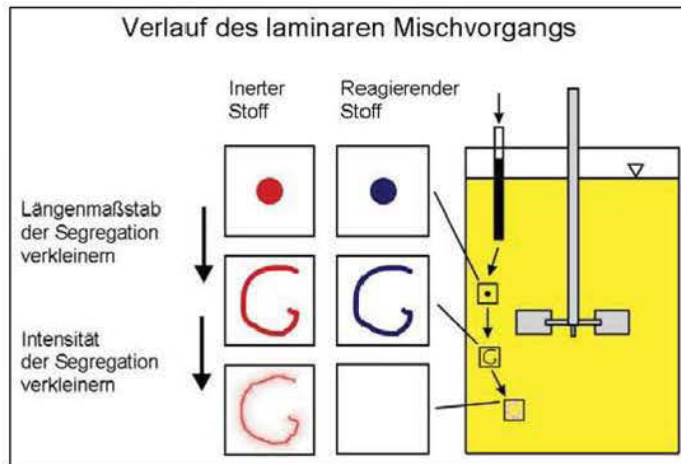
Abbildung 1
Schematische Darstellung des Ablaufs der Vermischung im laminaren Strömungsfeld

in der sich der inerte Farbstoff gleichmäßig im Behälter verteilt. Sie bewertet nicht die molekulare Vermischung zwischen vorgelegter und eingebrachter Komponente. Hierzu dient das mikroskopische Mischgütemaß als das Verhältnis aus den Konzentrationen des noch vorhandenen und sich entfärbenden Farbstoffs zu denjenigen des ursprünglich vorhandenen Farbstoffs. Die beiden Mischzeiten werden simultan mit Hilfe der tomographischen Zweiwellenlängenphotometrie gemessen. Sie ermöglicht es, gleichzeitig die räumlichen Konzentrationsfelder der beiden Farbstoffe zu messen.

Der kausale Zusammenhang zwischen der gemessenen Konzentration einer auf molekularem Ortsmaßstab vermischten inerten Farbkomponente und der auf dem gleichen Ortsmaßstab mit dem gleichen Mechanismus vermischten reagierenden Komponente, dient zum Quantifizieren der durch die chemische Reaktion infolge Mikromischens verschwundenen Komponente mit Hilfe des Deviationsgrades.

Der Verlauf des laminaren Vermischens und sein Einfluss auf inerte und reagierende Stoffe sind schematisch in Abbildung 2 dargestellt.

Im ersten Schritt des Vermischens wird der Längenmaßstab der Segregation, das heißt die Lamellendicke, durch Strecken und Falten der eingebrachten Fluidelemente herabgesetzt. Zusätzlich tritt Diffusion auf, deren Einfluss allerdings aufgrund des großen Längenmaßstabs der Segregation sehr gering ist. Darum verändert sich die Intensität der Segregation nur geringfügig, das heißt es findet kaum Mikromischung statt. Eine Entfärbungsreaktion kann somit nicht ablaufen, da hierfür die molekulare Vermischung erforder-



Visualisieren der Mikro- und Makrovermischung durch Einbringen einer Mischung aus einem inerten und einem sich entfärbenden Farbstoff in den Behälter

derlich ist. Wenn der Längenmaßstab der Segregation weiter abnimmt, bewirken die großen Konzentrationsgradienten den Stofftransport durch Diffusion. Dieser zweite Schritt führt zur Intensitätsabnahme des reagierenden Farbstoffes, wohingegen der inerte Farbstoff aus makroskopischer Sicht unverändert bleibt. Nach dem abgeschlossenen Mikromischvorgang verbleibt nur der inerte Farbstoff. Das lokale Konzentrationsverhältnis des reagierenden Farbstoffes zum inerten Farbstoff ist somit ein Maß für die lokale Intensität der Segregation.

In Abbildung 3 ist die Farbstoffverteilung in Abhängigkeit der Mikromischgüte für eine Lamelle aus einem inerten roten und einem sich entfärbenden blauen Farbstoff dargestellt. Bereiche, in denen beide Farbstoffe vorliegen, erscheinen schwarz. Da in dem linken Bereich der Lamelle der reagierende Farbstoff noch nicht abgebaut ist, ist dieser Bereich noch nicht mikrovermischt. Es hat also noch kein molekularer Ausgleich zwischen der Lamelle und der umgebenden Flüssigkeit stattgefunden. Der mittlere Bereich der Lamelle enthält noch reagierenden Farbstoff, obwohl bereits ein Teil abgebaut und eine Rotfärbung zu erkennen ist. Es hat also zum Teil ein molekularer Ausgleich stattgefunden. Der rechte Teil der Lamelle enthält dagegen überhaupt keinen reagierenden Farbstoff mehr und ist somit völlig mikrovermischt.

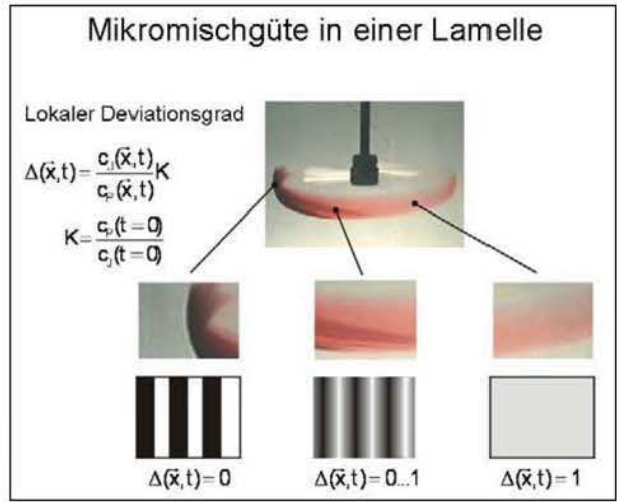


Abbildung 3
 Farbstoffverteilung in Abhängigkeit der Mikromischgüte für eine Lamelle aus einem roten und einem blauen Farbstoff

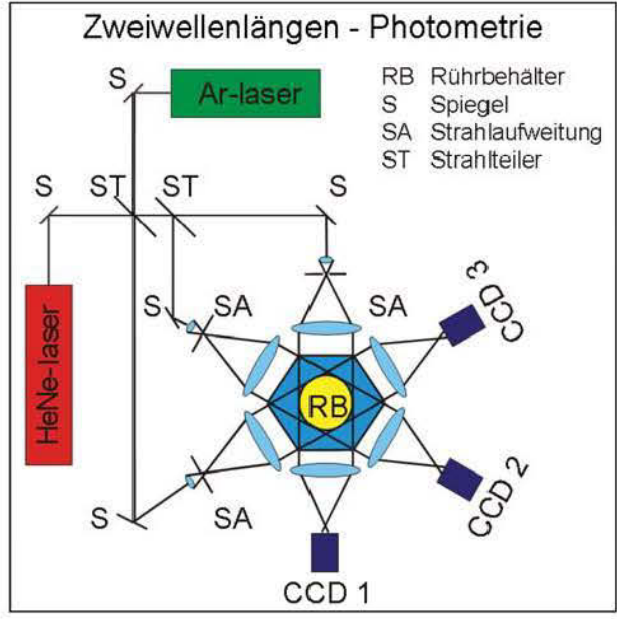


Abbildung 4
 Optischer Aufbau für die tomographischen Zweiwellenlängenphotometrie

Der optische Aufbau für die tomographische Zweiwellenlängenphotometrie ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Strahlen eines Argon-Ionen-Lasers mit der Wellenlänge 514 nm und eines Helium-Neon-Lasers mit der Wellenlänge 632 nm werden in einem Strahlteiler überlagert und mit einem zweiten Strahlteiler in drei überlagerte Strahlen aufgeteilt. Die drei Strahlen werden auf den Durchmesser 150 mm aufgeweitet und dienen zum Durchstrahlen des Rührgefäßes. Sie werden nach ihrem Austritt aus dem Rührgefäß mit Hilfe von Konvexlinsen auf drei CCD-Kameras fokussiert und erzeugen dort Abbildungen der Konzentrationsfelder.

Das Vermischen der Farbstoffe verläuft im Rührgefäß so schnell, dass für die tomographische Rekonstruktion alle Projektionen gleichzeitig aufgenommen werden müssen. Diese Forderung begrenzt die Anzahl der Projektionen. Es werden daher nur drei Kameras verwendet, deren Bilder simultan von einem Computer digitalisiert und gespeichert werden.

Die Berechnung der dreidimensionalen Konzentrationsfelder erfolgt aus den entlang der Teilstrahlen gemessenen Stoffmengen mit Hilfe eines erprobten Rekonstruktionsverfahrens. Hierfür wird das Gefäß entsprechend der Anzahl der Teilstrahlen in 30 Ebenen und jede Ebene wiederum in 1220 prismenförmige Elemente mit der Seitenlänge von 3 mm unterteilt. Die Konzentration in jedem der so entstandenen 36.600 Elemente wird berechnet. Die berechneten Konzentrationsprofile des inerten Farbstoffs und der Deviationsgrad als Maß der Vermischung sind in Abbildung 5 dargestellt.

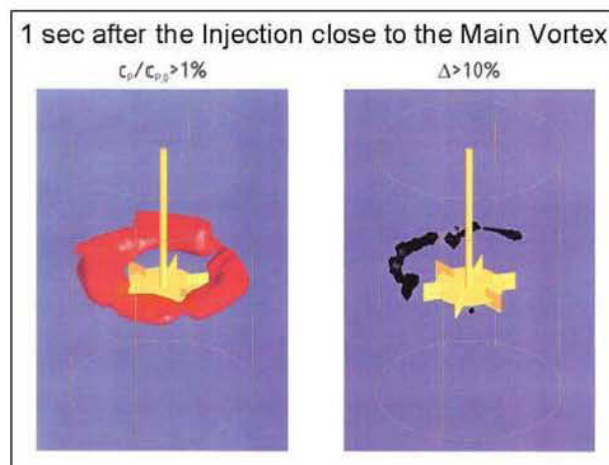


Abbildung 5
Verteilung von inertem Farbstoff und Deviationsgrad nach Zugabe an den Rührerblättern

Nach einer Sekunde ist der in Form eines Tropfens zugegebene flüssige Farbstoff ein-dimensional längs des Hauptwirbels gedehnt. Zunächst ist der Längenmaßstab der Segregation noch groß. Daraus resultieren sein langsamer diffusiver Ausgleich mit der Umgebung und ein hoher Deviationsgrad in einem Großteil des Tropfens. Nach drei Sekunden ist ein Teil des Farbstoffes noch in der Nähe seiner ursprünglichen Position. Der andere Teil wird bereits durch den Rührer transportiert. Die Farbstoffwolke erhält eine schlauchförmige Form, die sich aufgrund der Scherung ergibt.

2 Dimensionieren einer Blasensäule und Voraussage von deren Wirksamkeit für den Stoffaustausch

Blasensäulen werden in der chemischen Industrie für zahlreiche Prozesse verwendet. Es handelt sich um zylindrische, von einer Flüssigkeit durchströmte Apparate, in deren Sumpfquerschnitt eine Gasphase in Form von Einzelblasen dispergiert wird. Die entstehenden Blasen steigen als Blasenschwarm infolge der im Schwerfeld wirksamen Auftriebskräfte auf. Im Kopfquerschnitt der Blasensäulen entsteht durch die Koaleszenz der Blasen eine zusammenhängende Phasengrenze der in kontinuierlicher Form strömenden flüssigen Phase. Die Gasphase entweicht während die flüssige Phase je nach Phasenführung aus Kontinuitätsgründen abwärts strömt. Das resultierende Strömungsfeld der Flüssigkeit ist dreidimensional und zeitlich veränderlich. Für Volumenstromdichten des Gases unter ca. 10 cm/s ist die homogene Strömungsform zu beobachten. Die Blasen besitzen einen nahezu einheitlichen Durchmesser und die Wechselwirkungen zwischen den Blasen sind gering. Für größere Volumenstromdichten des Gases treten starke Wechselwirkungen zwischen den Blasen auf, so dass ihre Größe durch Koaleszenz und Zerfall lokal variiert. Diese heterogene Strömungsform ist durch vom Strömungsfeld abhängige Verteilungen der Blasengrößen gekennzeichnet. Ein großer Anteil des Gases wird in Form von so genannten Großblasen transportiert. Die Verweilzeit dieser Blasen ist kürzer als die Verweilzeit der kleineren Blasen.

Für viele technische Anwendungen ist neben der Gasphase ein partikelförmiger Feststoff in der Flüssigkeit suspendiert. Er hat häufig die Funktion eines Katalysators. Dies bedeutet, dass an der festen Oberfläche eine heterogene chemische Reaktion abläuft. Durch die Partikeln werden die Phasenverteilung und die Geschwindigkeitsfelder beeinflusst, so dass der Umsatz heterogen katalysierter Reaktionen in dreiphasig betriebenen Blasensäulen neben dem Strömungsfeld von der Verteilung des Feststoffs und der sich einstellenden Phasengrenzfläche abhängig ist.

Das Dimensionieren von Blasensäulen erfolgt bislang mit Hilfe empirischer Gleichungen auf der Basis experimenteller Ergebnisse, die an Anlagen im Labormaßstab ermittelt sind. Der Gültigkeitsbereich dieser Korrelationen ist durch die Wahl des Stoffsystems, die Abmessungen der Versuchsanlage und die experimentell variierten Parameter begrenzt. Insbesondere ist die Übertragung vom Labor- in den technischen Maßstab nur unvollkommen möglich, da die Strömungsfelder und die Rückvermischung der Phasen von den Abmessungen des Reaktors beeinflusst werden.

Ziel experimenteller und theoretischer Arbeiten ist es, die Geschwindigkeits- und Konzentrationsfelder in zwei- und dreiphasig betriebenen Blasensäulen auf der Grundlage der vorliegenden Beobachtungen und Messungen mit Hilfe von Bilanzgleichungen und Stoffgesetzen auf numerischem Wege zu berechnen. Dazu liegen aus Experimenten zahlreiche Beobachtungen vor. Diese besagen, dass die Phasenverteilungen in drei- und zweiphasig betriebenen Blasensäulen eine große Übereinstimmung aufweisen. Mit Hilfe der Ultraschalltomographie gemessene Phasenverteilungen und Strömungsfelder werden durch die in Abbildung 6 schematisch dargestellte Skizze wiedergegeben.

Die Gasblasen steigen als Blasenschwamm vorrangig in der Säulenmitte auf. Im Zentrum des Schwarms und im Wandbereich der Blasensäule sind die Volumenanteile des Feststoffs gering. Dagegen wird in den Randbereichen des Blasenschwarms der Feststoff aufwärts transportiert. Die Flüssigkeit strömt im Bereich des Blasenschwarms aufwärts und im Wandbereich abwärts.

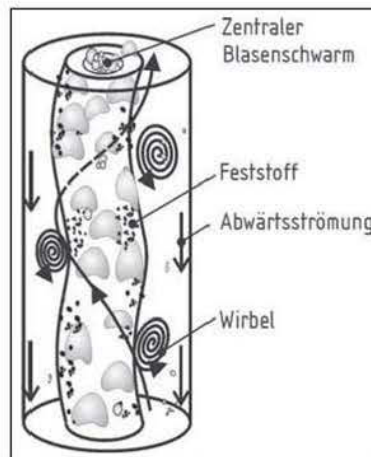


Abbildung 6
Phasenverteilung und Strömungsfeld in einer dreiphasig betriebenen Blasensäule

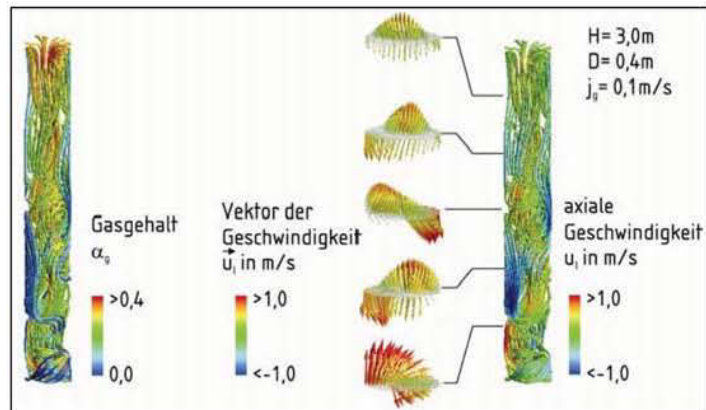


Abbildung 7
Berechnetes Geschwindigkeitsfeld der Flüssigkeit und Volumenanteil des Gases

Für eine Blasenensäule mit 0,4 m Durchmesser und 3,0 m Höhe ist in Abbildung 7 das berechnete Strömungsfeld in Form der Stromlinien und des Vektorfeldes für einzelne Querschnitte zu einer beliebig gewählten Zeit dargestellt. Die Volumenstromdichte des Gases beträgt 0,1 m/s, so dass sich die heterogene Strömungsform einstellt.

Das Geschwindigkeitsfeld der Flüssigkeit ist durch Stromlinien dargestellt. Es ist durch großräumige Wirbel gekennzeichnet, deren Abmessungen denen des Säulendurchmessers entsprechen. Für eine unter Umgebungsdruck mit Wasser und Luft betriebene Blasenensäule von 3 m Höhe ist entsprechend dem idealen Gasgesetz eine Verringerung der Gasdichte vom Sumpf- zum Kopfquerschnitt um 23 % zu erwarten. Dadurch wird der Volumenanteil des Gases erhöht und der Blasendurchmesser vergrößert.

Die Blasen steigen bevorzugt in der Säulenmitte auf, so dass in der Nähe der Säulenwand nur geringe Gasgehalte berechnet werden. Das Strömungsfeld wird durch den aufsteigenden Blasenschwarm induziert. Dementsprechend werden große axiale Geschwindigkeiten der Flüssigkeit in Bereichen hoher Gasgehalte berechnet. Die Flüssigkeit strömt in den Bereichen geringer Gasgehalte, also überwiegend im Bereich der Säulenwand, abwärts. Die Vektoren der Flüssigkeitsgeschwindigkeit sind für einzelne Querschnittsebenen dargestellt. In radialer Richtung bilden sich Gradienten der axialen Flüssigkeitsgeschwindigkeit aus. Die Beträge der Geschwindigkeitskomponenten sind in Umfangsrichtung geringer als diejenigen in axialer Richtung.

In Abbildung 8 sind die spezifischen Phasengrenzflächen beider Blasenfraktionen dargestellt.

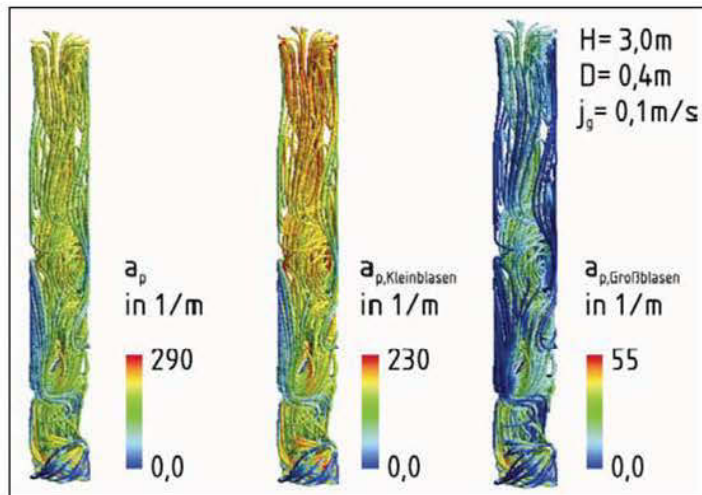


Abbildung 8
Berechnete spezifische Phasengrenzfläche

Die aus den spezifischen Phasengrenzflächen beider Blasenfraktionen resultierende mittlere spezifische Phasengrenzfläche ist besonders in der Säulenmitte groß. In den Randbereichen werden nur kleine spezifische Phasengrenzflächen erhalten. Die spezifische Phasengrenzfläche der Kleinblasen nimmt mit der Säulenhöhe zu. Die Ursache liegt in der Verringerung des hydrostatischen Drucks und der dadurch bewirkten Vergrößerung der Blasen. Das Entstehen von Großblasen erfolgt in Bereichen hohen Gasgehalts, so dass für die entsprechende Gasphase eine Erhöhung der spezifischen Phasengrenzfläche vor allem im Bereich der Säulenmitte berechnet wird. In den wandnahen Bereichen liegen keine Großblasen vor. Für das berechnete Strömungsfeld wird der Großteil der Phasengrenzfläche durch die Kleinblasen gebildet.

In Abbildung 9 sind die Strömungsfelder für feststoffhaltige Flüssigkeiten dargestellt. Das Strömungsfeld der Flüssigkeit ist wie für die zweiphasigen Gas-Flüssigkeits-Strömungen von großräumigen Flüssigkeitswirbeln gekennzeichnet. Die Stromlinien des Feststoffs verlaufen nahezu identisch mit denen der Flüssigkeit.

Der Volumenanteil des Feststoffs ist in der Nähe der Säulenwand höher als in der Säulenmitte. Mit zunehmender axialer Koordinate nehmen die Volumenanteile des Feststoffs und des Gases ab.

Als Beispiel für die industrielle Anwendung einer heterogenen chemischen Reaktion wird die Hydrierung von Anthrachinon zu Hydroanthrachinon in Gegenwart eines Palladium-Katalysators gewählt. Diese Reaktion stellt einen Teilschritt beim Herstellen von Wasserstoffperoxid dar.

In Abbildung 10 ist der Reaktionsweg zur Synthese von Wasserstoffperoxid schematisch dargestellt.

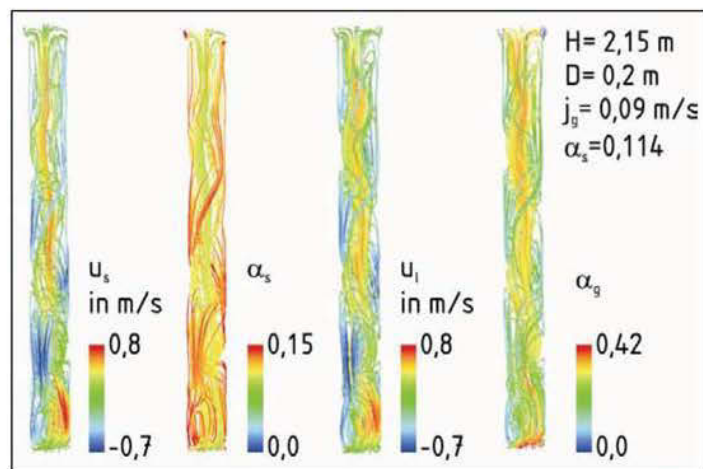


Abbildung 9
Berechnete momentane Strömungsfelder des Feststoffs und der Flüssigkeit

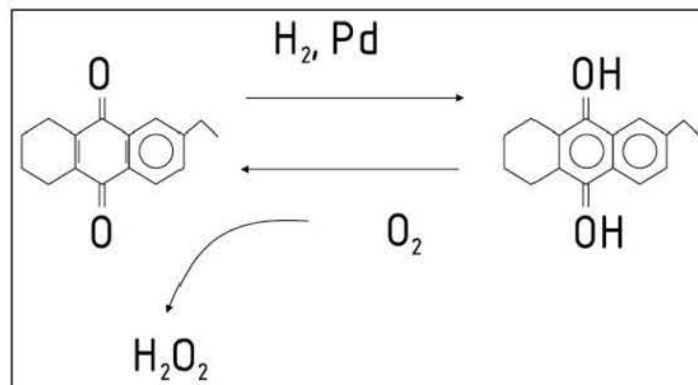


Abbildung 10
Reaktionsablauf zur Herstellung von Wasserstoffperoxid

Für die industrielle Durchführung der Hydrierung sind unterschiedliche Verfahren möglich, die sich hinsichtlich der Anthrachinone, der Lösungsmittel und der Katalysatoren unterscheiden. Am häufigsten wird dabei ein Anthrachinon-Gemisch verwendet, das zu etwa 30 Mol % aus Ethylanthrachinon und zu 70 Mol % aus 2-Ethyl-Tetrahydroanthrachinon besteht. Als Katalysatoren werden entweder Raney-Nickel oder Palladium verwendet. Die Reaktionskinetik ist für beide Anthrachinonkomponenten nahezu gleich, so dass für die Berechnung von einer Anthrachinonkomponente ausgegangen werden kann.

Für Wasserstoff liegt in Gegenwart des Palladium-Katalysators eine Reaktion für Wasserstoff von nullter Ordnung und für Anthrachinon von erster Ordnung vor.

Die Hydrierung kann in Blasensäulenreaktoren unter Umgebungsdruck und für Temperaturen zwischen 18°C und 62°C am Palladium-Katalysator stattfinden. Der Katalysator besteht aus mit Palladium beschichteten Aluminiumpartikeln.

Für die Berechnungen werden die flüssige, die partikelförmige feste und die gasförmige Phase im Gleichstrom geführt. Alle drei Phasen werden gleichmäßig über den Sumpfqerschnitt der Säule eingespeist.

Für eine Blasensäule mit 4 m Höhe und 0,4 m Durchmesser ist das berechnete Strömungsfeld in Abbildung 11 dargestellt.

Durch die Absorption und die nachfolgende chemische Reaktion nimmt der Massenanteil des in der Flüssigkeit gelösten Wasserstoffs nur wenig mit der axialen Koordinate zu. Der Massenanteil des flüssigen Reaktanden (THEAQ) wird vom Sumpf- zum Kopfquer-

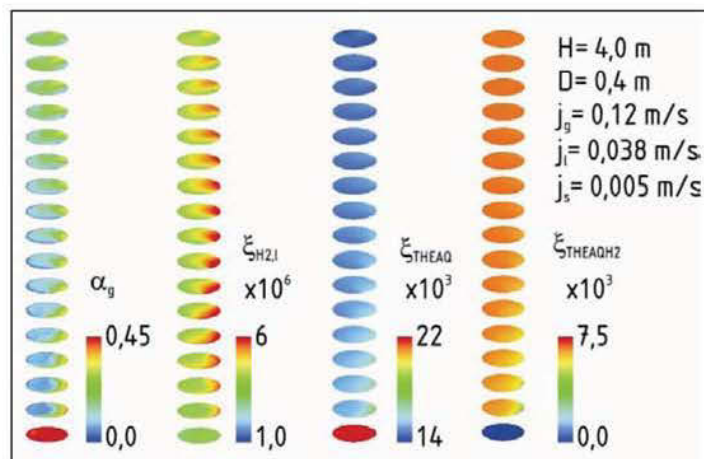


Abbildung 11
Gasgehalt und Massenanteile der Edukte und Produkte

schnitt stark verringert. Dementsprechend nimmt der Massenanteil des Produkts (THEAQH₂) zu. Im Kopfquerschnitt sind 36 % des flüssigen Edukts umgesetzt. Die axiale Durchmischung der flüssigen Phase bewirkt, dass für die gegebenen Betriebsbedingungen nur geringe räumliche Gradienten der Massenanteile auftreten.

Im Rahmen der dargestellten Ergebnisse werden Populationsbilanzen für die disperse Phase zur Beschreibung der Blasengrößenverteilung in Form der Transportgleichungen mit den strömungsmechanischen Gleichungen eines Euler-Modells gekoppelt, um damit die instationären, dreidimensionalen Konzentrations- und Geschwindigkeitsfelder unter Berücksichtigung des Stoffaustauschs und der chemischen Reaktion zu berechnen. Damit sind erstmalig Stofftransportvorgänge in Abhängigkeit lokaler Blasengrößenverteilungen berücksichtigt, wobei gleichzeitig dreiphasige Strömungen auf theoretisch numerischem Wege vorhergesagt werden

3 Schadensanalyse für einen Kondensator zum Verflüssigen von Siliziumtetrachlorid

Die Aufgaben des im Betrieb tätigen Verfahreningenieurs sind sehr vielfältig. Auf dem Gebiet der Analyse von Betriebsstörungen ist er gezwungen, neue, für ihn bisher unbekannte kausale Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung herzustellen. Hierbei ist es erforderlich, sowohl ingenieurwissenschaftliche Grundlagen als auch das gewonnene Erfahrungswissen zu den verarbeiteten Produkten und zum betriebenen Prozess einfließen zu lassen. Dies soll am Beispiel eines durch Korrosion beschädigten Rohrbündelkondensators erläutert werden.

Er dient zum Verflüssigen von Siliziumtetrachlorid und besteht aus einem Rohrbündel, welches in einen zylindrischen Mantel eingebaut ist. Die Rohre werden von Wasserstoff und dampfförmigem Siliziumtetrachlorid durchströmt. Im Mantelraum befindet sich Ethylenglykol, welches die Rohre auf etwa -20°C kühlt. Dadurch verflüssigt sich das Siliziumtetrachlorid im unteren Teil des Rohrbündels, während durch die darüber liegenden Rohre der gasförmige Wasserstoff strömt.

In dem beschädigten und in Abbildung 12 dargestellten Apparat haben Risse in den Rohren zum Eintritt von Ethylenglykol in den Rohrrinnenraum geführt. Die dort abgelaufene chemische Reaktion hat weißes Siliziumdioxid entstehen lassen, welches sich als weiße Kruste ablagert und die Rohre verstopft. Der vom Ingenieur erkannte kausale Zusammenhang zwischen der Ursache für die chemische Reaktion und dem im Betriebsablauf festgestellten Versagen des Apparates führt sofort zur Frage nach dem kausalen Zusammen-



Abbildung 12
Blick auf den Rohrboden eines beschädigten Kondensators.

hang zwischen der noch unbekanntem Ursache und der beobachteten Rissbildung an den Rohren. Hierzu sind Kenntnisse über das Korrosions- und Festigkeitsverhalten der eingesetzten Werkstoffe, die konstruktive Gestaltung der Verbindung zwischen Rohrboden und Rohrbündel sowie die fertigungstechnische Verarbeitung beim Herstellen der zuletzt genannten Verbindung notwendig. Sie führten im vorliegenden Falle zu einer geänderten konstruktiven Gestaltung der Verbindung der einzelnen Rohre mit dem Rohrboden.

4 Zusammenfassung

Der Verfahreningenieur bedient sich während seiner täglichen Arbeit in allen Bereichen der Prozesstechnik Arbeitsmethoden, welche durch die Kausalität als Beziehung zwischen Wirkungen aus vorgegebenen Ursachen gekennzeichnet sind. Sie befähigen ihn, wissenschaftliche Grundlagen für die Vorhersage von Ereignissen beim Entwickeln und Projektieren sowie im umgekehrten Sinne Schadensfälle aufzuklären. Letztere sind stets der Anlass für Verfahrensverbesserungen und zum Senken von Betriebskosten.

Kausaler Zusammenhang von Komplexität und Dynamik in der Produktion

1 Einleitung

Um ihre Chancen am Markt zu verbessern, besinnen sich viele Unternehmen auf ihre Kernkompetenzen und gehen deshalb Kooperationen mit Zulieferern und Distributoren ein. Dadurch entstehen zwischen vielen einzelnen unabhängigen Unternehmen starke Verflechtungen, aus denen Produktionsnetzwerke entstehen. Sie zeichnen sich durch eine ständig wachsende Komplexität aus und sind heutzutage mehr denn je gezwungen, sich schnell an sich dynamisch verändernde Märkte anzupassen. Diese und weitere Faktoren erschweren eine unternehmensübergreifende Produktionsplanung und -steuerung (PPS) dieser Netzwerke enorm. Die PPS stellt dabei verschiedene Methoden und Verfahren bereit, um die Wirtschaftlichkeit der Produktion zu „optimieren“ und sich dadurch im Wettbewerb behaupten zu können. Relevante Zielgrößen sind hier u. a. Termintreue, Durchlaufzeit, Qualität und Auslastung. All diese Größen beschreiben die wirtschaftliche Leistung bzw. die Konkurrenzfähigkeit eines Unternehmens.

Da die Komplexität und die Dynamik der Netzwerke eine so große Rolle für die einzelnen Unternehmen spielen, beschäftigen sich aktuelle Forschungsarbeiten mit der Thematik. Grundsätzlich lässt sich das Phänomen der Dynamik und der Komplexität aber nicht nur in Netzwerken finden sondern in fast jeglicher Art von Produktionssystemen. Im Einzelnen weist nicht nur das Netzwerk an sich eine hohe Dynamik auf, sondern es lässt sich in einzelnen Unternehmen oder sogar an einzelnen Produktionsstätten eine gewisse Dynamik identifizieren. Und auch der Komplexitätsbegriff ist nicht an die Existenz eines Netzwerkes gebunden. Sie tritt allein durch die Ablaufreihenfolge von Arbeitsschritten auf unterster Ebene auf.

Es stellt sich nun die Frage, inwieweit Komplexität und Dynamik kausal zusammenhängen. Im Folgenden werden beide Begriffe einzeln erläutert, verschiedene Ansätze zu ihrer Messbarkeit vorgestellt und der entsprechende kausale Zusammenhang hergestellt. Es wird sich zeigen, dass ein kausaler Kreislauf aus Komplexität und Dynamik besteht: aus Dynamik entsteht Komplexität und aus Komplexität entsteht Dynamik.

2 Komplexität erzeugt Dynamik

Komplexität wird je nach Autor und Wissenschaftsgebiet unterschiedlich definiert und kann im Allgemeinen als „Vielschichtigkeit“ umschrieben werden. Eine weitere allgemeine Definition besagt, dass Komplexität verstanden werden kann als die Eigenschaft eines Systems oder Modells, die Beschreibungen seines Gesamtverhaltens in einer beliebigen Sprache zu erschweren, selbst wenn man vollständige Informationen über seine Einzelkomponenten und ihre Wechselwirkungen besitzt.

Bislang ist der Komplexitätsbegriff bereits in vielen Bereichen der Wissenschaft eingesetzt worden. In der Informatik zum Beispiel bezeichnet Komplexität ein Konzept zum Ressourcenverbrauch von Algorithmen, die so genannte algorithmische Tiefe. Die Informationstheorie dagegen verwendet den Begriff für den Informationsgehalt von Daten. In den Wirtschaftswissenschaften beschäftigt sich vor allem das Themengebiet Komplexitätsmanagement mit der Thematik. Relevant für die Produktion ist die Systemtheorie. Sie ist ein interdisziplinäres Forschungsgebiet, das der Beschreibung und Erklärung komplexer Phänomene dient. Die Analyse von Strukturen und Funktionen soll häufig Vorhersagen über das Systemverhalten erlauben. Ulrich und Probst [Ulr88] untersuchten zu diesem Zweck die Anzahl der im System enthaltenen Elemente, ihre Vernetzung und die Anzahl unterschiedlicher Systemzustände. Laut Scherer [Sche98] sind Systeme im Allgemeinen nicht in einfacher Weise beschreibbar, was er als subjektive Komplexität interpretiert. Des Weiteren führt er eine Unterscheidung zwischen struktureller (Anzahl Elemente und deren Vernetzung) und dynamischer Komplexität (feedback-loops, dynamisches und nichtlineares Verhalten) ein. Allgemein beziehen sich diese Studien auf jegliche Art von Systemen. Aber die Theorie kann ohne weiteres auf Produktionssysteme angewendet werden.

In allen oben genannten Bereichen steht natürlich eine Quantifizierung der Komplexität im Vordergrund, um verschiedene Untersuchungsgegenstände vergleichbar zu machen. Dieses Vorhaben gestaltet sich in der Informationstheorie recht einfach. Nach Shannon [Sha49] kann die so genannte Entropie zur Quantifizierung des Informationsgehalts von Daten herangezogen werden. Sie ist ohne großen Aufwand zu berechnen und ist ein Maß für Redundanz der Daten, also deren Informationsgehalt. In ihrem Ursprung kann sie als Analogon zur physikalischen Bedeutung der Entropie angesehen werden, die nach Clausius und Boltzmann die Wahrscheinlichkeitsbetrachtung der Fluktuationen eines Vielteilchen-Systems beschreibt. Sie ist in diesem Fall also ein Maß für die Unsicherheit, den exakten Zustand eines Systems zu kennen. Beispielsweise kann ein Behälter mit Gas durch seine Zustandsgrößen Temperatur, Druck und Volumen beschrieben werden. Diese Grö-

ßen sind einfach und präzise messbar. Aber es kann unmöglich der Ort und der Impuls jedes einzelnen Teilchens des Gases bestimmt werden. Es können also recht einfach makroskopische Größen quantifiziert werden, aber die mikroskopischen entziehen sich unserer Kenntnis.

Diese Tatsache ist mit einem Produktionssystem vergleichbar. Makroskopische Größen, wie mittlere Durchlaufzeit, Work-in-process (WIP) oder ähnliche sind ohne großen Aufwand zu bestimmen, aber es kann im Allgemeinen aufgrund der riesigen Informationsflut ähnlich wie bei obigem Beispiel nicht der Ort und der Prozessschritt jedes einzelnen Teils im Produktionssystem erfasst werden. Deshalb liegt es nahe, den Entropiebegriff auf Produktionssysteme zu übertragen. Dieser Schritt wurde bereits zum Beispiel von Frizelle und Woodcock [Fri95] gemacht. Sie definierten Gleichungen zur Quantifizierung von Komplexität auf Basis der Vielfalt und Unsicherheit von Informationen innerhalb des Systems.

Eine einzige Kennzahl kann aber nur selten allen Facetten der Komplexität gerecht werden. Deshalb zeigte Costa [Cos05] eine Möglichkeit auf, komplexe Netzwerke durch einen Merkmalsvektor zu charakterisieren. So sind auch verschiedene Systeme vergleichbar und ihre Komplexität kann auf einfache Weise quantifiziert werden. Allerdings wird bei diesem Ansatz nicht zwischen den unterschiedlichen Aspekten der Komplexität differenziert.

Dadurch wird klar, dass die Darstellung der Komplexität durch eine Zahl oder einen Vektor dem Ziel nicht gerecht wird. Vielmehr müssen die unterschiedlichen Aspekte der Komplexität einzeln in Betracht gezogen werden. Suh [Suh05] definiert zu diesem Zweck vier unterschiedliche Arten von Komplexität.

Als erstes wird zwischen zeitabhängiger und zeitunabhängiger Komplexität unterschieden. Die erstere beschreibt alle statischen Eigenschaften des Produktionssystems, die zu einem bestimmten Zeitpunkt auftreten und sich nicht ändern, während die zweite alle dynamischen Eigenschaften beschreibt, die sich im Verlauf der Zeit ändern können. Beide teilen sich wiederum ein weiteres Mal auf. So beinhaltet die zeitunabhängige Komplexität eine reale und eine imaginäre Komponente. Der Unterschied zwischen beiden lässt sich durch die genaue Kenntnis über das System erklären. Ein vollständig beschriebenes System kann durch seine Wirkungszusammenhänge, Bestandteile, seine räumliche und zeitliche Ausdehnung als komplex eingestuft werden. Diese wird dann als reale Komplexität bezeichnet. Hingegen entsteht die imaginäre Komplexität auf Grund von mangelndem Wissen oder Verständnis der genauen Beschreibung des Systems.

Die zeitabhängige Komplexität tritt auf, da zukünftige Ereignisse das System in unvorhersehbarer Weise beeinflussen können. Dies kann sich periodisch nach einem gewissen Zeitraum wiederholen, ohne dass das System dadurch instabil oder chaotisch auf einer längeren Zeitskala betrachtet reagiert (periodische Komplexität). Im Gegensatz dazu steht die kombinatorische Komplexität, die das eben erwähnte periodische Verhalten nicht an den Tag legt und so das System instabil oder chaotisch werden lassen kann. Der Name rührt daher, dass Entscheidungsprobleme meist kombinatorischer Art sind und die zukünftige Entwicklung des Systems ausschlaggebend von den Entscheidungen, zum Beispiel über Disposition oder Terminplanung abhängt.

Eine umfangreichere Darstellungsmöglichkeit verschiedener Aspekte der Komplexität ist eine Darstellung als Würfel [Phi06]. Dabei spiegeln seine drei Dimensionen die unterschiedlichen Komponenten wider: die zeitspezifische, die organisationale und die systemische. Bereits in der Definition von Suh wurden zeitunabhängige und zeitabhängige Gründe für Komplexität ausgemacht. An dieser Stelle kann aber die weitere Unterteilung beider nach verschiedenen Kriterien vernachlässigt werden. Denn durch eine genaue Untersuchung des Systems kann die imaginäre Komponente der Komplexität eliminiert werden, so dass die reine reale Komplexität übrig bleibt, die dann als zeitunabhängige Komponente wahrgenommen wird. Auch die kombinatorische Komplexität kann durch verschiedene Methoden als periodische ausgedrückt werden und verbleibt als zeitabhängige Komponente. Es wird also nur die dynamische, zeitabhängige und statische, zeitunabhängige Komponente der Komplexität betrachtet. Diese Unterscheidung wird aber der Diversität des Komplexitätsbegriffes in Produktionssystemen nicht gerecht. Deshalb wird die Dimension der zeitspezifischen Komponente durch zwei weitere, die organisationale und die systemische Komponente, auf drei Dimensionen erweitert. Die systemische Komponente bezieht sich auf externe und interne Faktoren des Systems, die durch die Systemgrenze voneinander getrennt werden. Informations- und Materialflüsse, Systemelemente und deren Beziehungen innerhalb des Systems bestimmen die interne Komplexität, während die externe Komplexität von den gleichen Bausteinen aber über die Systemgrenze hinaus definiert wird. Die organisationale Komponente umfasst sowohl die prozessspezifische Komplexität als auch die strukturelle. Dabei beschränkt sich erstere auf die Komplexität, die durch die Anzahl und Vielfältigkeit der Prozesse hervorgerufen wird. Die strukturelle Komplexität entsteht hingegen durch die Anzahl und Verbindung von Systemelementen. Eine Visualisierung der dreidimensionalen Darstellung mit einer Vektorquantifizierung der Komplexität ist in Abbildung 1 zu sehen.

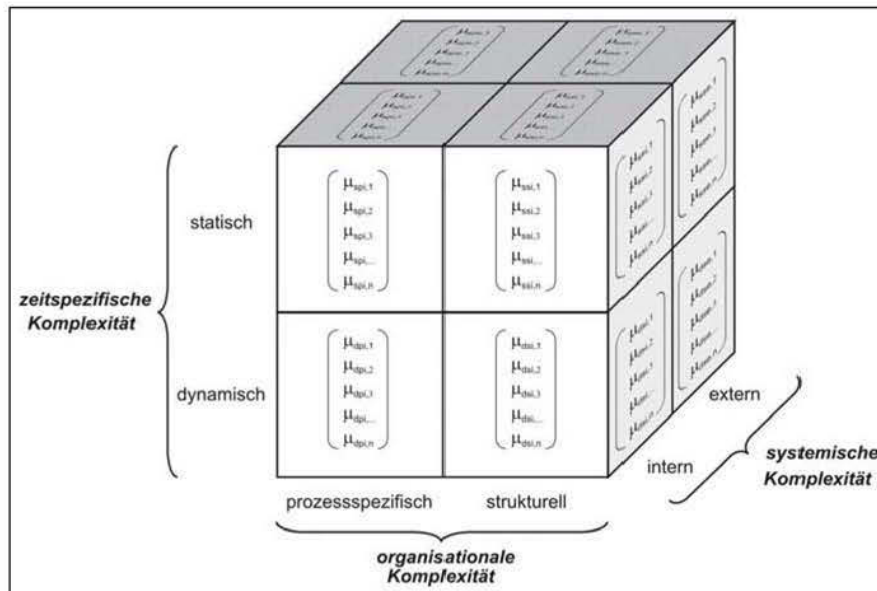


Abbildung 1
Darstellung der Quantifizierung der Komplexität mit Hilfe eines Würfels [Phi06].

Wichtigste Neuerung ist hierbei, dass nicht die Gesamtheit der Komplexität durch eine einzige Zahl ausgedrückt wird, sondern vielmehr komponentenspezifisch eine Kennzahl oder ein Vektor bestimmt wird. Das bedeutet letztendlich, dass zusätzlich zur Quantifizierung der Komplexität auch ihre Lokalisierung innerhalb eines dreidimensionalen Raumes möglich wird. Die Koordinaten dieses Raumes bestimmen dann die Zugehörigkeit der untersuchten Komplexität zu den oben genannten Klassen.

Mit diesem Hilfsmittel kann nun der kausale Zusammenhang zwischen Komplexität und Dynamik untersucht werden. Dabei kann die zeitspezifische Komplexität ohne Einschränkung der Allgemeinheit vernachlässigt werden, weil sie selbst aus der Dynamik hervorgeht (vgl. Abb. 1). Die weiteren Aspekte der Komplexität und deren dynamische Auswirkungen auf das System werden im Folgenden beleuchtet. Die systemischen Komponenten, die durch die Systemgrenze voneinander separiert werden, führen zu zwei unterschiedlich behandelbaren Szenarien. Die externe Komplexität beschreibt die verschiedenen unternehmensübergreifenden Prozesse und Strukturen und ist somit eine Charakterisierung von Produktionsnetzwerken. In unterschiedlichen Veröffentlichungen wurden in solchen Netzwerken bereits dynamische Aspekte festgestellt. Als Beispiele sollen

an dieser Stelle irreguläre Wirtschaftszyklen [Hel04] und der so genannte Bullwhip-Effekt [Lee97] genannt sein. Ersteres beschreibt das Auftreten von nichtperiodischen Oszillationen in einem kontinuierlichen Flussmodell von Produktionsnetzwerken. Dabei hängt die Dynamik des Systems extrem von der Topologie des Netzwerks, aber auch von Parametern wie Preis- oder Bestellpolitik ab. Dadurch wird deutlich, dass durch die strukturelle Komplexität des Netzwerks eine gewisse Dynamik induziert wird.

Der Bullwhip-Effekt beschreibt ein ähnliches Szenario, dass in Lieferketten mit mehr als zwei Knoten kleine Veränderungen in der Kundennachfrage am Ende der Kette zu starken Oszillationen im Bestand und in der Produktionsrate entlang der gesamten Lieferkette führen können. Allerdings wird dies nicht anhand eines Modells gezeigt, sondern durch Untersuchungen an Unternehmen. Als Ergebnis haben Lee et al. [Lee97] für dieses Phänomen vier Hauptgründe ausgemacht: Falsche oder schlechte Vorhersage der Nachfrage, Bestellungen zusammenfassung, Preisfluktuationen, spekulative Bestellung bei Niedrigbeständen. All diese Gründe können innerhalb des Würfelmodells der Komplexität als Vektorkomponenten in der prozessspezifischen, internen oder externen Komplexität wieder gefunden werden.

Die interne Komplexität hingegen beschreibt unternehmensinterne Prozesse und Strukturen, also beispielsweise Fertigungsanweisungen, Kommunikationswege oder das Fabriklayout. Durch historisch gewachsene Strukturen und Prozesse, also nicht analytisch oder wissenschaftlich ermittelte Optimierungen, kann die Komplexität der Produktion durchaus zu einer erhöhten internen Dynamik führen. So kann es im Zuge von Erweiterungen und Vergrößerungen des Maschinenparks dazu kommen, dass diese nicht mehr optimal angeordnet sind und somit zwischen ihnen Material unnötig weit transportiert werden muss, was einer erhöhten Dynamik gleich kommt. Außerdem tragen informationsverarbeitende Prozesse durch nicht optimale Taktung, also zu lange Aktualisierungszyklen, dazu bei, dass eine nicht optimale Produktionsplanung und -steuerung zu Ineffizienzen und höherer Dynamik führt. Es zeigt sich also in unterschiedlichen Ausprägungen, dass in der Produktion die Komplexität als eine kausale Ursache der Dynamik angesehen werden kann.

3 Dynamik erzeugt Komplexität

Um die Bidirektionalität der Kausalbeziehung zwischen Dynamik und Komplexität herzustellen, ist nun zu zeigen, dass nicht nur die Komplexität in Produktionssystemen zu Dynamik führt, sondern ebenfalls der umgekehrte Fall, dass aus Dynamik Komplexität

folgt, auftritt. Dazu ist es vorab notwendig, die Dynamik zu charakterisieren, um erwünschte und nicht erwünschte bzw. beherrschbare und nicht beherrschbare Effekte zu trennen.

Im Allgemeinen wird von Dynamik gesprochen, wenn ein System oder ein Prozess Veränderungen unterliegt. In einem Produktionssystem bedeutet dies, dass beispielsweise Bestände schwanken, Durchlauf- oder Prozesszeiten variieren. Aber auch Maschinenstandorte oder Prozessschritte können sich ändern. Ein erstes Kriterium ist die Unterscheidung zwischen nicht-deterministischer und deterministischer Dynamik. Im ersten Fall liegt dem Verhalten des Systems kein deterministisches Gesetz zugrunde, es kann also aus dem aktuellen Zustand nicht auf den folgenden Zustand geschlossen werden. Diese Systeme sind im Allgemeinen stochastischer Natur und sind mit den Gesetzen und Methoden der Statistik gut zu beschreiben. Genaue Vorhersagen über das zukünftige Systemverhalten können aber nicht getroffen werden, sondern vielmehr nur statistische Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten eines Ereignisses aufgezeigt werden.

Der interessantere Fall, dass dem Prozess eine deterministische Dynamik zugrunde liegt, ist bereits aus der Physik, im Speziellen aus der Theorie der dynamischen Systeme, bekannt. Hier wurden bereits vielfältige Arbeiten zur Klassifizierung derartiger Systeme geleistet. So lässt sich die Dynamik durch unterschiedliche Kennzahlen charakterisieren, deren korrekte Interpretation eine Aufteilung in unterschiedliche Dynamikformen ermöglicht. Die wohl am weitesten verbreiteten und bekanntesten Methoden sind die Berechnung des Leistungsspektrums und der Autokorrelation. Beides sind lineare Methoden und geben Hilfestellungen zur Erkennung von Periodizitäten in einem Signal. Aus der nichtlinearen Zeitreihenanalyse sind zum Beispiel das Phasenraumportrait, die Lyapunov-exponenten und die Dimensionsbestimmung bekannt. Um diese Begriffe erklären zu können, sind einige Grundlagen notwendig. Der Zustand eines beobachteten Systems wird eindeutig durch einen Satz von Beobachtungswerten, den Variablen oder Observablen, beschrieben. Sie spannen einen Zustandsraum auf, den so genannten Phasenraum. Ein Punkt hierin definiert dann den Zustand des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt – es können einfach die Koordinaten abgelesen werden, die mit den Beobachtungswerten identifiziert werden. Der zeitliche Verlauf hingegen wird durch eine Hintereinanderreihung von Punkten, also einer Kurve beschrieben, die so genannte Trajektorie. Innerhalb dieses Phasenraums kann es nun Bereiche geben, die benachbarte Trajektorien anziehen, so genannte Attraktoren.

Durch die oben genannte Dimensionsbestimmung wird der Freiheitsgrad einer Bewegung oder eines gesamten Systems quantifiziert und kann auf verschiedene Arten berech-

net werden. Die Lyapunovexponenten sind ein Maß für die Konvergenz bzw. Divergenz benachbarter Trajektorien in den einzelnen Freiheitsgraden. So beschreibt ein negativer Lyapunovexponent, dass benachbarte Trajektorien in der betrachteten Raumdimension auf einem Attraktor zusammenlaufen; ein positiver Exponent beschreibt, dass sich diese Trajektorien exponentiell voneinander entfernen; und ein Wert von Null zeigt, dass ein kritisches Verhalten vorliegt. Die Visualisierung der Dynamik kann durch ein Phasenraumportrait geschehen. Dabei wird in der Regel eine Trajektorie des Systems in einem Koordinatensystem dargestellt. Dabei können unterschiedliche Attraktortypen auftreten, die ausführlich in [Arg04] beschrieben werden. Ein Vergleich der unterschiedlichen Typen und deren Kennzahlen ist in Abbildung 2 zu sehen.

Ein Problem all dieser Methoden ist, dass eine Differenzierung zwischen stochastischer und chaotischer Dynamik nicht trivial ist. Beide können ähnliche Kennzahlen aufweisen, aber vollkommen unterschiedlichen Grundlagen unterliegen. Außerdem fällt ins Gewicht: je größer das System, also je mehr Variablen, desto höher-dimensional der Zustandsraum und umfangreicher die Dynamik.

Phasen-Portrait	Zeit-Verlauf	Leistungs-Spektrum	Auto-Korrelation	Lyapunov-Exponenten	Dimension (z.B. D_c)
				- - -	0
				0 - -	1
				0 0 -	2
				+ 0 -	$2 < D_c < 3$

Abbildung 2
 Verschiedene Attraktoren und deren Kennzahlen (aus [Arg04]).

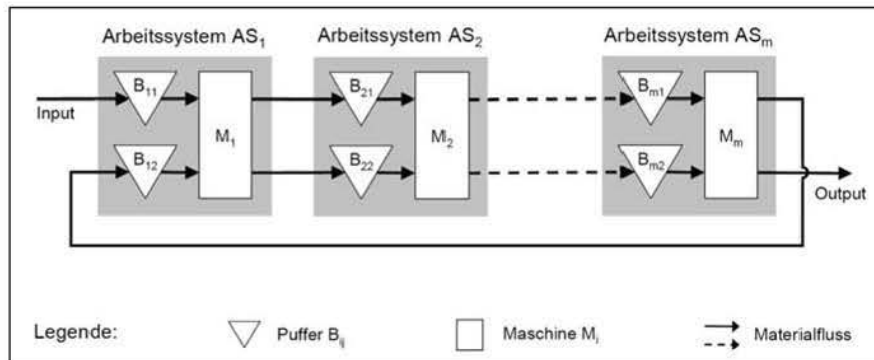


Abbildung 3
 Schematische Abbildung des betrachteten Modells [Fre05].

Diese Methoden und Klassifizierungswerkzeuge haben aber nicht nur theoretischen Wert, sondern können auch in der Produktionstechnik eingesetzt werden. So zeigen sich in einem einfachen Modell aus zwei Arbeitssystemen mit Materialrückfluss bereits deutlich dynamische Effekte (für eine ausführliche Darstellung sei auf [Fre05] verwiesen).

Dieses Modell besteht aus zwei Arbeitssystemen ($AS_1 + AS_2$) mit je einer Produktionseinheit. Die Arbeitsinhalte gelangen in den ersten Puffer (b_{11}) des ersten Arbeitssystems, werden bearbeitet und zu Beginn einer neuen Arbeitsschicht in das nachgelagerte System (AS_2) transportiert. Das heißt, dass die Bearbeitung als kontinuierlicher Fluss approximiert und der Transport zwischen den Arbeitssystemen zeitdiskretisiert wird. Im zweiten System gelangen sie in den ersten Puffer (b_{21}), werden bearbeitet und in den zweiten Puffer des ersten Systems (b_{12}) transportiert. Da jedes Arbeitssystem nur eine Produktionseinheit besitzt, muss an dieser Stelle die Entscheidung getroffen werden, welcher Puffer zu erst bedient werden soll. Hier kommt die „Last-Buffer-First-Serve-Regel“ zum Einsatz. Das bedeutet, dass als erstes der Puffer mit den am weitesten bearbeiteten Teilen, hier also der zweite, geleert wird. Danach werden die Teile in den zweiten Puffer des zweiten Systems transportiert und hier ebenfalls nach erwähnter Last-Buffer-First-Serve-Regel bearbeitet. Es werden also die Arbeitsinhalte der Puffer b_{21} denen der Puffer b_{11} vorgezogen.

Da sich dieses System durch eine Vielzahl an Observablen auszeichnet, wird der Einfachheit halber nur die zeitliche Entwicklung des ersten Puffers betrachtet. Dies ist aber legitim, da sich selbst aus der Beobachtung einer Variablen die Dynamik des gesamten Systems rekonstruieren lässt. Beispielhaft soll hier das Phasenraumportrait des Puffers b_{11} des Modells dargestellt werden. Dazu wurden Simulationen des Modells durchgeführt,

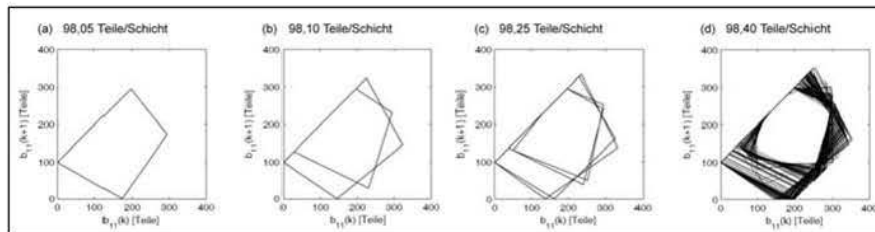


Abbildung 4
Periodenverdopplungen und Chaos im vorgestellten Modell [Fre05].

wobei alle Parameter konstant gehalten wurden bis auf die Eingangsrate des ersten Puffers im ersten Arbeitssystem. Dieser eine Parameter unterlag nur geringen Änderungen, aber wie in Abbildung 4 zu sehen ist, haben diese geringen Abweichungen starken Einfluss auf die Dynamik des Systems. So ist in Abbildung 4a ein periodisches Verhalten zu erkennen: Nach vier Zeitschritten erreicht das System wieder seinen Ausgangszustand. Hingegen verdoppelt sich die Anzahl der Zeitschritte in Abbildung 4b auf acht und in Abbildung 4c auf 16. Im letzten dargestellten Bild (Abbildung 4d) ist keine Periodizität mehr zu erkennen, so dass von einem chaotischen Verhalten gesprochen werden kann.

Dieses Periodenverdopplungsverhalten kann in vielen Modellen in der nichtlinearen Dynamik wieder gefunden werden und ist auch allgemein als „Weg ins Chaos“ bekannt.

Es zeigt sich also, dass Dynamiken auftreten können, die nicht oder kaum beherrschbar sind. So führt die Beherrschung von stochastischen, also nicht-deterministischen Prozessen zu einer statistischen Behandlung, die nur Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten eines Ereignisses oder Schätzwerte für relevante Größen liefern kann. Es muss also immer mit Ungenauigkeiten gerechnet werden, was den gesamten Produktionsprozess und vor allem dessen Planung und Steuerung anfällig für Probleme macht. Um alle Eventualitäten berücksichtigen zu können, muss dadurch ein komplexes Planungs- und Steuerungswesen installiert werden. Ähnlich verhält es sich beim Auftreten von deterministischem Chaos. Hier existiert zwar eine Reihe von Regelungs- und Steuerungsmethoden, doch kann ihre Anwendung durchaus als komplex eingestuft werden. So muss die Dynamik vorangehend gründlich analysiert werden und dann eine adäquate Methode gefunden werden. Dieses Unterfangen kann sehr aufwendig sein, da es kein einfaches Rezept gibt, diese spezielle Methode zu finden. Es ist also zunächst nötig, das System und seine Dynamik zu modellieren. Anschließend muss dann aus einem Pool von mög-

lichen Methoden die richtige gefunden und deren Parameter zusätzlich noch angepasst werden. Dieses Verfahren ist normalerweise bei Veränderung der Dynamik zu wiederholen, denn grundsätzlich muss eine Steuerung bei veränderten Bedingungen nicht weiterhin gute Resultate erzielen. Somit wird deutlich, dass Dynamik zu einer Erhöhung der prozessspezifischen Komplexität führt.

Die Dynamik kann, wie bereits erwähnt, beispielsweise in Form von Bestands- und Bedarfsschwankungen auftreten. Durch eine Verstärkung dieser Dynamik kann sich ein produzierendes Gewerbe gezwungen sehen, seine Puffer und Lager anzupassen und gegebenenfalls auszubauen, um durch genügend hohe Sicherheitsbestände die Dynamik auszugleichen. Eine weitere Möglichkeit, dem zu begegnen, ist eine Erhöhung der Flexibilität der Produktion. Das kann sich in Form flexibler Auslastung von Maschinen so ausdrücken, dass Maschinen bei Bedarf zum Beispiel umgerüstet werden oder sich die Verteilung der Arbeitsinhalte auf unterschiedliche Maschinen flexibel an deren Auslastung orientiert. Dadurch entstehen neue Transportwege zwischen verschiedenen Arbeitsstationen, um die Erhöhung der Flexibilität zu erreichen. Beide Beispiele zeigen, dass die Beherrschung der Dynamik ebenfalls zu einer Erhöhung der strukturellen Komplexität führt.

Die auffälligste Beziehung zwischen Komplexität und Dynamik ist aber schon bei Betrachtung des Komplexitätswürfels in Abbildung 1 zu erkennen. Eine der drei Komponenten der Komplexität selbst besitzt eine dynamische Komponente. Es besteht also ein direkter kausaler Zusammenhang zwischen der Dynamik eines Systems und seiner Komplexität, denn die Messungen der Dynamik oder dynamischer Einflussfaktoren spezifizieren einen Teil der Komplexität selbst. Dies stimmt mit bisherigen Veröffentlichungen zu dem Thema überein, denn viele Autoren nutzten den Ansatz, dass grundsätzlich ein Auftreten von Komplexität durch dynamische Veränderungen beschrieben werden kann (z. B. [Sche98, Suh05]). Es besteht also in dieser Richtung nicht nur ein kausaler Zusammenhang zwischen Dynamik und Komplexität, sondern vielmehr ist die Dynamik ein fester Bestandteil.

Eine genauere Einordnung dieser Phänomene in den Komplexitätswürfel zeigt, dass sich die Dynamik einerseits in systeminterne und -externe Bestandteile aufteilen lässt. Dabei spielt die Systemgrenze eine entscheidende Rolle, denn während die interne Komplexität eine Produktionsstätte und deren Dynamik beschreibt, führt die externe Komplexität zur Beschreibung von Netzwerken und dem Zusammenspiel der kooperierenden Unternehmen. Andererseits spielt die Dynamik in der organisationalen Sicht eine ebenfalls gewichtige Rolle. Hierbei lassen sich dynamische Effekte sowohl in der Prozesssicht als auch in der Struktursicht erkennen. Dass Prozesse, sowohl intern als auch extern, auf sich verändernde Umweltbedingungen angepasst werden, ist selbstverständlich. Ebenso rea-

giert auch die strukturelle Komponente auf Dynamik, so dass beispielsweise die Topologie der Netzwerke sich ändert oder aber unternehmensintern zum Beispiel das Fabriklayout den veränderten Bedingungen angepasst wird.

Abschließend lässt sich feststellen, dass sowohl die Komplexität zu Dynamik führt, als auch die Dynamik zu Komplexität. Es ist also ein sich selbst verstärkender Kreislauf gegeben, wenn keine adäquaten Gegenmaßnahmen getroffen werden.

4 Lösungen und Ausblick

Um die Wirtschaftlichkeit eines Produktionssystems insgesamt sicherzustellen, ist auch darauf zu achten, die Produktionsplanung und -steuerung effektiv arbeiten zu lassen und den Arbeitsaufwand dafür in Grenzen zu halten. Denn ein zu hoher Planungsaufwand verbraucht nur unnötige Ressourcen. Deshalb ist es von großer Wichtigkeit, den beschriebenen kausalen Kreislauf zwischen Dynamik und Komplexität zu durchbrechen. Dazu muss entweder der Einfluss der Dynamik auf die Komplexität oder umgekehrt der Einfluss der Komplexität auf die Dynamik reduziert werden. Auf den ersten Blick läuft das auf zwei klassische Möglichkeiten hinaus: entweder die Dynamik zu beherrschen oder die Komplexität zu verringern.

Gängige Methoden zur nachträglichen Beherrschung der Dynamik sind Ansätze aus der Steuerungs- und Regelungstheorie. Die Theorien sind in ihren spezifischen Fachrichtungen recht ausgereift und werden vielfach bereits in der Produktion erprobt bzw. angewendet. Es besteht hier aber weiterhin Forschungsbedarf. Ein anderer viel versprechender Ansatz ist die Anwendung von Methoden der Synchronisationstheorie [Scho04a].

Die interne Komplexität zu verringern, muss an dieser Stelle leider nicht immer zum Ziel führen. Die nichtlineare Dynamik zeigt, dass selbst einfachste Systeme bei falscher Parameterwahl chaotisches Verhalten zeigen können (z. B. Duffing-Oszillator [Arg94]), was ebenfalls in Modellen einfacher Produktionssysteme beobachtet wurde [Kat00]. Es kommt also nicht nur darauf an, wie hoch die Komplexität einzuschätzen ist, sondern auch in welchem Raumbereich des Komplexitätswürfels sie auftritt und unter welchen Bedingungen (also mit welchen Parametern) das System arbeitet. So sollte in Zusammenhang mit einer Komplexitätsverminderung eine umfangreiche Analyse der dynamischen Eigenschaften einhergehen, um das Produktionssystem zu optimieren.

Mit der externen Komplexität, die zu einer Dynamik innerhalb von Netzwerken führt, beschäftigt sich die so genannte „Complexity Science“ (z. B. [Hey06]). Die lokalen Regeln

innerhalb eines Knotens sind festgelegt und auch recht simpel. Allerdings führen sie im Allgemeinen zu global nicht vorhersagbarem Verhalten. Auch diesem Phänomen kann mit den klassischen Ansätzen nicht begegnet werden.

Es zeigt sich also, dass die klassischen Konzepte zwar in den jeweiligen Theorien gute Ergebnisse erzielen, diese aber nur teilweise in die Produktion übertragbar sind. Aber es existieren bereits Konzepte, die zur Lösung dieser Probleme herangezogen werden können. Dazu gehören unter anderem die Selbststeuerung, Multi-Agenten-Systeme (MAS) und Selbstorganisation.

Die Selbststeuerung [Fre04, Scho04b] beschäftigt sich mit der dezentralen Entscheidungsfindung in Prozessen. Es findet also keine zentrale Produktionsplanung und -steuerung statt, sondern auf unterster Ebene besitzen die Objekte, wie Maschinen oder Produkte, eine gewisse Intelligenz und Informationen, um selbständig Entscheidungen zu treffen. Dadurch soll das System robuster werden gegenüber Störungen und in der Lage sein, Dynamik und Komplexität flexibel zu bewältigen. Man spricht hier auch von positiver Emergenz.

Eine Möglichkeit, dies zu realisieren, sind die so genannten autonomen Agenten (auch MAS). Dies sind in der Regel Systeme aus mehreren gleichartigen oder unterschiedlich spezialisierten handelnden Einheiten, die in Zusammenarbeit ein Problem lösen. In der Regel werden sie durch Softwareprogramme dargestellt. In Produktionsnetzwerken können diese die unternehmensübergreifende Produktionsplanung und -steuerung übernehmen [Scho03].

Aus dem Bereich der Selbstorganisation lässt sich beispielsweise ein Prinzip verwenden, nach dem Ameisenkolonien Probleme lösen. Dabei kommt ein pheromon-basierter Ansatz zum Tragen. Wird eine Ameisenstraße durch ein Hindernis blockiert, so werden die Tiere zufällig neue Wege suchen. Dabei setzt sich grundsätzlich nach einiger Zeit der optimale durch. Dieses Verfahren ist eine weitere Möglichkeit, die Produktion innovativ zu „optimieren“ und Dynamik und Komplexität zu beherrschen [Scho04c].

Es hat sich also gezeigt, dass Komplexität und Dynamik einen kausalen Kreislauf bilden, der mit den klassischen Methoden nur schwer durchbrochen werden kann. Vielmehr muss der Fokus bei der Erforschung neuer Methoden in der „Complexity Science“ und der nichtlinearen Dynamik gesucht werden. So gelten die vorgestellten Ansätze wie Selbststeuerung, Autonome Agenten oder Selbstorganisation durchaus als viel versprechend für die Steuerung der Produktion.

Literatur

- [Arg04] Argyris, J., Faust, G. & M. Haase: Die Erforschung des Chaos: Eine Einführung für Naturwissenschaftler und Ingenieure, Braunschweig: Vieweg, 1994.
- [Cos05] Costa, L., Rodrigues, F. A., Travesio, G. & P. R. Villas Boas: Characterization of complex networks: A survey of measurements. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0505185>, 2005.
- [Fre04] Freitag, M., Scholz-Reiter, B. & O. Herzog: Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen. In: *Industrie Management* 20 (2004) 1, S. 23–27.
- [Fre05] Freitag, M.: Modellierung und Analyse von Produktionssystemen mit Methoden der Nichtlinearen Dynamik. In: Scholz-Reiter, B. (Hg.), *Informationstechnische Systeme und Organisation von Produktion und Logistik*, Band 3, Berlin: GITO-Verlag, 2005.
- [Fri95] Frizelle, G. & E. Woodcock: Measuring Complexity as an aid to develop operational strategy. In: *International Journal of Operations and Production Management* 15 (1995) 5, S. 26–39.
- [Hel04] Helbing, D., Lämmer, S., Witt, U. & T. Brenner: Network-induced oscillatory behavior in material flow networks and irregular business cycles. In: *Physical Review E* 70 (2004), 056118.
- [Hey06] Heylighen, F., Cilliers, P. & C. Gershenson: Complexity and Philosophy. <http://arxiv.org/abs/cs/0604072>, 2006.
- [Kat00] Katzorke, I. & A. Pikovski: Chaos and Complexity in a Simple Model of Production Dynamics. In: *Discrete Dynamics in Nature and Society* 5 (2000), S. 179.
- [Lee97] Lee, H. L., Padmanabhan, V. & S. Whang: The Bullwhip Effect in Supply Chains. In: *Sloan Management Review* 38 (1997), S. 93–102.
- [Phi06] Philipp, T., Böse, F. & K. Windt: Autonomously Controlled Processes – Characterisation of Complex Production Systems. In: *Proceedings of the 3rd International CIRP Sponsored Conference on Digital Enterprise Technology, Setubal, Portugal, 2006*, CD-ROM.
- [Sche98] Scherer, E.: The Reality of Shop Floor Control – Approaches to Systems Innovation. In: Scherer, E. (Hg.), *Shop Floor Control – A Systems Perspective*, Berlin: Springer Verlag, 1998.
- [Scho03] Scholz-Reiter, B. & H. Höhns: Integrated software agents: enabling technology for collaborative E-logistics and E-business. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, London, 2003, S. 517–525.
- [Scho04a] Scholz-Reiter, B. & G. Middelberg: Synchronisation vs. Linkage in Supply Chains: Opportunities and Problems of a Systems Theoretical Approach. In: *CIRP Proceedings*,

- International Conference On Competitive Manufacturing, COMA '04, Progress in Innovative Manufacturing, 2004, S. 427–432.
- [Scho04b] Scholz-Reiter, B., Windt, K. & M. Freitag: Autonomous Logistic Processes – New Demands and First Approaches. In: Proceedings of the 37th CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems, 2004, S. 357–362.
- [Scho04c] Scholz-Reiter, B., Jagalski, T., Peters, K., Wenning, B.-L., Freitag, M., Timm-Giel, A. & C. de Beer: Strategies of Social Insects and other Bio-Inspired Algorithms for Logistics: State of the Art and New Perspectives. In: Timm, I. J. et al. (Hg.), Proc. of the Workshop on Applied Artificial Intelligence and Logistics at the 27th German Conference on Artificial Intelligence (KI2004), 2004, S. 17–20.
- [Sha46] Shannon, C. E.: A mathematical theory of communication. In: The Bell System Technical Journal 27 (1948), S. 379–423 und S. 623–656.
- [Suh05] Suh, N. P.: Complexity in engineering. In: 2005 CIRP General Assembly; Manufacturing Technology, CIRP Annals, vol. 54, no. 2, 2005, S. 581–598.
- [Ulr88] Ulrich, H. & G. Probst: Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln, Bern, Stuttgart: Haupt, 1988.

Walter Michaeli

Kausalität in der Kunststofftechnik

1 Was ist Kunststofftechnik?

Kunststofftechnik befasst sich mit allen Fragen zur Herstellung von Kunststoffprodukten mit spezifischen Anwendungsmerkmalen.

Die Kunststofftechnik konzentriert sich dabei auf die Wechselwirkungen zwischen Werkstoff, Erzeugnisconstruction (Bauteilconstruction) und Verarbeitung (Abb. 1) [1], um hieraus Machbarkeit und Gebrauchseigenschaften abzuleiten. Dieses geschieht in der Absicht, innovative Kunststoffprodukte umweltfreundlich und marktfähig technisch zu realisieren. Damit sind Inhalt kunststofftechnischer Tätigkeit nicht nur Bauteile und Halbzeuge aus Kunststoff, sondern auch die Generierung und Aufbereitung der Kunststoffe und die für die Herstellung sowie zur sinnvollen Weiterverwertung nach der Gebrauchsphase erforderlichen Maschinen, Verfahren und Entwicklungsprozesse [1].

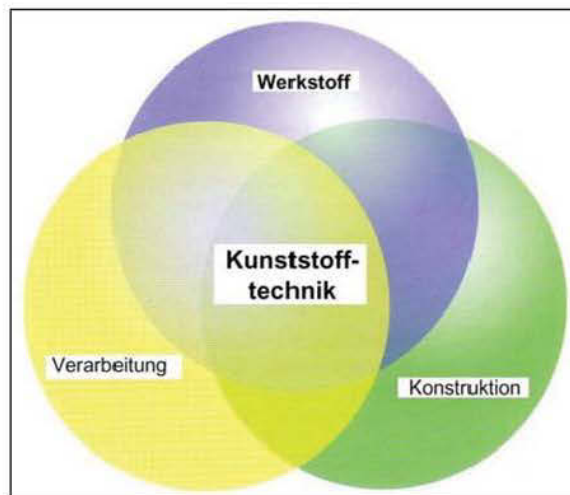


Abbildung 1
Elemente der Kunststofftechnik (WAK Broschüre) [1]

Die Kunststofftechnik verwendet neben Erkenntnissen der Naturwissenschaften auch die Erfahrungssystematik, Intuition und die schöpferische Kraft des Ingenieurs, um zu technisch neuen und wirtschaftlich interessanten Lösungen zu kommen. Sie versteht sich als Summe der ingenieurmäßigen Kenntnisse und Fertigkeiten im Bereich der Werkstoffkunde der Kunststoffe, des Konstruierens mit Kunststoffen und der Kunststoffverarbeitung. Die Verbindung wissenschaftlicher Vorgehensweise und praktischer Umsetzung wird dabei als besondere Herausforderung gesehen [1].

Oder anders ausgedrückt: Objekt der Kunststofftechnik ist die Herausforderung durch einen äußerst komplexen Prozess, es geht darum – ausgehend von einem Anforderungsprofil (Pflichtenheft) – ein qualitätsgesichertes, rentables Produkt herzustellen. Denkt man hier zum Beispiel an einen Kunststoffformteilhersteller, so hat er die Linie „Produktkonstruktion (Werkstoffauswahl, Dimensionierung, Prototyping), Werkzeugkonstruktion, Werkzeugfertigung, ggf. Maschinenmodifikation (z. B. Handling, integrierte Montage), Prozessführung, Qualitätsüberwachung, Verpackung“ zu beherrschen und permanent zu optimieren. Hierbei wird er jedoch immer wieder auf zunächst nicht beantwortbare Fragen, welche letztlich Herausforderungen für die Ingenieurwissenschaften darstellen, stoßen. Hier steht er dann unmittelbar vor der Frage nach Kausalität, dem Verständnis von konkreten Ursachen und Wirkungen.

Hierbei helfen natürlich viele Erkenntnisse der klassischen Naturwissenschaften, der Physik und der Chemie, jedoch gilt bereits an dieser Stelle festzuhalten, dass aufgrund einer Vielzahl von Eingriffs- und Störgrößen in einem technischen Prozess (oder bei der Nutzung und dem Betrieb eines technischen Produktes) meist keine klaren und eindeutigen, rein kausalen „wenn-dann“-Zusammenhänge formulierbar sind, sondern unwillkürlich Unschärfen auftreten und es diese zu bewerten und zu beherrschen gilt, ohne die Grundsätzlichkeit der gewählten technischen Lösung unmittelbar – und hierbei auch meist ungerechtfertigt – zu verwerfen. Das heißt der Ingenieur bewegt sich oft in einem von den Einflussgrößen her sehr komplexen Raum und muss dabei relative Optionen für die jeweilige beste Prozessbeherrschung und Produktleistung suchen.

Dabei verliert die Korrelation zwischen Ursache und Wirkung im Detail betrachtet und aufgrund fehlender Kenntnisse der Zusammenhänge zunächst scheinbar an Schärfe, was jedoch notwendigerweise noch nichts über die Güte des letztendlich erzielten Ergebnisses (z. B. die Prozessbeherrschung, die erzeugten Produkteigenschaften) aussagt, denn dem Ingenieur kommt es letztlich auf die Beherrschung des Gesamtprozesses an. Hier zeigt er gegenüber dem Naturwissenschaftler durchaus zunächst die „Eigenart“ – so der Prozess und das Produkt störungsfrei laufen –, zufrieden zu sein und sich der nächsten Heraus-

forderung zu stellen. Wird das Eine oder Andere, oder gar Beides, nicht erreicht, so muss – und geht – der Ingenieur zurück an die Arbeit und versucht, Ursachen und Wirkungen im erneuten Ansatz etwas kausaler zu erhellen.

Somit kann er sich letztlich einer Kausalitätsdebatte auch nicht entziehen. In diesem Spannungsfeld bewegt sich auch die Modellierung und Simulation in der Kunststofftechnik.

2 Modellierung und Simulation in der Kunststofftechnik

Wie in vielen anderen technischen Bereichen ist der Rechner in ganz besonderer Weise in der Kunststofftechnik zum Handwerkzeug schlechthin geworden. Er unterstützt erfolgreich die Umsetzung der Vision, Prozesse und Produkteigenschaften quasi vom Molekül bis zum fertigen Bauteil voraus zu denken.

Diese Vision beinhaltet, dass ein Kunststoffproduktentwickler in Zukunft am Bildschirm mittels eines 3D-CAD-Systems sein Produkt gestaltet, danach über eine Simulation der Herstellung des Produktes seine Machbarkeit aus produktionstechnischer Sicht prüft und hierbei gleichzeitig Informationen über die endgültigen Eigenschaften seines so zunächst rein virtuell erzeugten Produktes erhält; das heißt in diesem zeitraffenden Prozess wird zunächst kein Werkzeug gebaut, keine Maschine aufgeheizt und kein reales Produkt erzeugt. Mit wenigen Rechnerbefehlen oder gar überlagerten Optimierungsprogrammen lassen sich dann beste Prozessbedingungen und günstige Produkteigenschaften finden. Auch können solche Programme dann quasi als wichtiges „Nebenprodukt“ Maschinenauswahl und -einstellungsdaten liefern, welche erlauben, das Produkt zum Beispiel in einem „toleranten Bereich“ nach der Definition von Taguchi zu fertigen [2]. Dies hilft, Rüstzeiten zu verkürzen und hilft der Qualitätssicherung.

Hierbei stellt sich die Simulation als ein universelles Werkzeug zum tief gehenderen Verstehen komplexer Zusammenhänge dar, gewährt Einblicke, welche mit vertretbarem experimentellem Aufwand nicht möglich wären, hilft wesentliche von unwesentlichen Einflussgrößen zu unterscheiden, erlaubt Schwachstellen zu erkennen und letztlich neue Ideen über das implementierte Computermodell eher „risikolos“ und auch meist kostengünstig zu erproben. Dies setzt natürlich entsprechende Modellbildung – und damit die mathematische Darstellung von Kausalitäten voraus. Die hierbei notwendigen Arbeitsschritte sind in Abbildung 2 dargestellt. Der Prozess der Modellbildung und Umsetzung in ein Simulationsprogramm kann nur interdisziplinär zwischen Ingenieuren, Physikern, Chemikern, Mathematikern und Informatikern beherrscht werden.

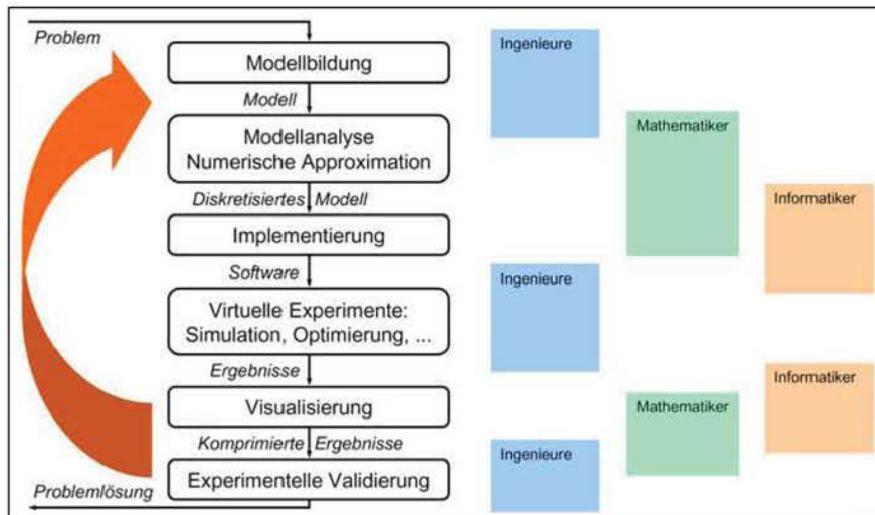


Abbildung 2

Zusammenarbeit unterschiedlicher Disziplinen bei der Modellierung und Simulation (Marquardt/Dahmen: Kompetenzzentrum Computational Engineering Science [CCES], 2003)

Je einfacher das zu simulierende Problem ist, umso eher kann eine direkte Übereinstimmung einer Berechnung mit der Realität erwartet werden.

Jedoch darf man die hierbei auftretenden Einschränkungen und Grenzen nicht übersehen: Je komplexer das zu simulierende Problem ist, umso weniger kann man in der Regel auf begleitende Experimente verzichten. Jedoch kann die Anzahl der Experimente meist deutlich reduziert oder der Aufbau von Prototypen (beispielsweise) meist deutlich fokussiert werden.

Die Simulation behandelt und beantwortet derzeit meist nur Teilfragen. Die Gründe hierfür liegen in der Tatsache – hier gespiegelt in den Fragestellungen und Herausforderungen der Kunststofftechnik („Vom Molekül zum Bauteil“) – dass Transport- und Austauschvorgänge in unterschiedlichen Skalenbereichen, das heißt Modellierungsebenen von makroskopischen Vorgängen bis zu Mechanismen auf atomarer Ebene auftreten und letztlich miteinander modellmäßig gekoppelt werden müssen. Dies ist jedoch in der gewünschten Durchgängigkeit bis heute noch nicht möglich.

Eine weitere Herausforderung besteht für den Modellierer darin, dass nicht alle Transport- und Austauschmechanismen letztlich berücksichtigt werden können, um überhaupt die Komplexität noch beherrschen zu können. Auch wird oft vergessen und übersehen,

dass letztlich in der Simulation nur solche Effekte beschrieben werden können, die auch bei der Modellbildung eingeschlossen wurden.

Dies selbst hängt wiederum eng mit der größten Herausforderung und Schwierigkeit für den Modellierer zusammen, nämlich den Gültigkeitsbereich seiner getroffenen Annahmen zu kennen und für diesen eine realistische Abstraktion des beschriebenen physikalischen Vorgangs zu machen. Oft bleibt hier nur die experimentelle (und damit oft aufwendige) Überprüfung der Annahmen.

Ist das Modell jedoch der realen Situation angepasst, so eröffnet die Simulation einzigartige Chancen, auch hochkomplexe Vorgänge im Detail zu verstehen und gezielt auf sie Einfluss zu nehmen.

So ist bereits vieles auf dem Weg von der Produktidee bis zum fertigen Kunststoffbauteil in Rechnern abgelegt und wird bereits heute in unseren Unternehmen zielführend genutzt: Werkstoffdaten, komplexe Werkstoffmodelle, Berechnungsroutinen für Gestaltungselemente von Formteilen, Algorithmen zur rheologischen, thermischen und mechanischen Werkzeugauslegung, CAD-Daten und deren Umwandlung in Steuerdaten für Werkzeugmaschinen, Schneckenauslegungsprogramme, Simulation von Umformvorgängen (z. B. beim Blasformen, Streckblasen, Thermoformen), Algorithmen zur Prognose von Formteilmerkmalen aufgrund gemessener Prozessdaten, Regelstrategien, abgeleitet aus Soll-Ist-Vergleichen, und vieles mehr [3].

Viele der genannten Dinge haben gemeinsame Schnittstellen und beeinflussen sich bekanntermaßen gegenseitig. Noch ist jedoch keine absolute Durchgängigkeit der möglichen Rechnernutzung für jede Problemstellung erreicht. Aber es hat sich wirklich Wesentliches in den vergangenen beiden Jahrzehnten getan. Das Wesentliche liegt natürlich hierbei vor allem darin, dass ein wirklich brauchbares Rechnerprogramm immer eine sehr klare und scharfe Analyse der dann durch einen Algorithmus zu beschreibenden Zusammenhänge verlangt. So ist der grundsätzliche theoretische Hintergrund erfolgreicher Kunststoffverarbeitung angewandte Wärmeübertragung und Stoffaustausch, angewandte Strömungslehre und Strukturmechanik, flankiert durch rheologische, thermische und mechanische Werkstoffmodelle [3].

Oft gibt es jedoch aufgrund der Komplexität der zu modellierenden Prozesse sowie meist schwer erfassbarer Störgrößen keine andere Möglichkeit, als mittels empirisch-statistischer Modelle weiterzukommen. Dies setzt Experimente und deren Vermessung voraus. Dieser Ansatz ist methodisch durchaus legitim und von äquivalenter Bedeutung im Vergleich zum rein theoretischen Beschreibungsversuch, oft jedoch in den meisten Fällen recht spezifisch und damit eingeschränkt in seiner Extrapolierbarkeit und Aus-

gegüte. Auch ist ein solcher Ansatz bei neuen, noch nicht umfassend theoretisch und experimentell unterstützten Prozessen, zum Beispiel für Nischenprodukte, das wirtschaftlich einzig vertretbare Verfahren der Wahl.

3 Komplexität und Kausalität

Kunststoffverarbeitung kann unterschiedlich komplex sein. Kausalitäten lassen sich dabei auf unterschiedliche Weise erfassen und darstellen. Dies sei anhand von vier Beispielen gezeigt.

Beispiel A: Verkleben mittels Kontakklebstoffen

Ein „einfacher“ Kunststoffverarbeitungsprozess ist das Verkleben von zwei Oberflächen mit einem lösemittelhaltigen Kontakklebstoff. Der Klebstoff wird auf die beiden trockenen, staub- und fettfreien Oberflächen gleichmäßig und möglichst dünn aufgetragen, danach lässt man das Lösungsmittel verdunsten, und erst wenn der Klebstoff sich trocken anfühlt, sollte die Klebung vorgenommen werden. Hierbei ist dann im Hinblick auf den zu erwartenden Klebungserfolg besonders wichtig, dass mögliche hohe Anpresskräfte im Moment des Fügens aufgebracht werden. – Dies alles steht bekanntlich auf der Packung und in der Gebrauchsanweisung solcher Klebstoffe und dürfte damit auch aus eigenen praktischen Erfahrungen bekannt sein.

Betrachtet man jedoch diese Problemstellung näher und sucht für Ursache und Wirkung molekulare Erklärungen dieser Aussagen der Gebrauchsanweisung, so gilt es im Hinblick auf eine möglichst hohe Haftfestigkeit, die bei solchen Klebstoffen durch zwischenmolekulare Nebervalenzkräfte (Adhäsion) erreicht wird und welche bekanntlich nur eine Reichweite von wenigen Nanometern besitzen, möglichst nur (im Idealfall) eine Atomlage Klebstoff flächendeckend aufzutragen, um anschließend über die Fügekräfte eine maximale atomare Wechselwirkung sicherzustellen.

Das Ergebnis in Form der erzielten Haftfestigkeit lässt sich eindeutig messen. Auch lassen sich experimentell Zusammenhänge zwischen Klebstoffschichtdicke, Abluftzeit (Zeit für die Verdunstung des Lösungsmittels) und Fügekraft (Anpressdruck) ermitteln. Die Messergebnisse in solchen Fügeuntersuchungen zeigen jedoch oft erhebliche Streuungen, welche ihre Ursache wiederum in Schwankungen der genannten Prozessparameter, der Oberflächenvorbehandlung oder gar der Chemie des Klebers/Lösungsmittels haben können.

Dennoch kann man bei diesem sehr einfachen Problem, wohlgerne mit einer letztendlichen, meist jedoch nicht zu beziffernden Unsicherheit, von einer ausreichend begründeten Anleitung zur Erzielung eines möglichst guten Klebeerfolgs sprechen. Die vier Größen Oberflächengüte (Vorbehandlung), Klebstoffschichtdicke, Abluftzeit und Anpressdruck beschreiben also für eine spezifische Fügeaufgabe (Art der Fügepartner, Kontaktklebstofftype) im technischen Sinne ausreichend genau einen Zusammenhang mit dem Fügeergebnis.

Wesentlich schwieriger wird es jedoch, ein physikalisch plausibles, für jeden Verklebungsfall geltendes Modell zur Darstellung dieser Zusammenhänge zu formulieren.

Unabhängig jedoch von dieser spezifischen Fragestellung gilt Folgendes festzuhalten: Der Mensch ist in der Regel meist noch in der Lage, vier Einflussgrößen und ihre Wirkung auf eine Zielgröße mental zu erfassen und nach ausreichend langer Beobachtung als Erfahrungswissen zu speichern. (Solches unterscheidet oft in der beruflichen Praxis den erfahrenen Anlagenbediener von dem weniger erfahrenen.)

Technische Prozesse sind jedoch meist wesentlich komplexer, wobei jedoch angemerkt sei, dass eine Segmentierung dieser in Teilelemente meist zielführend ist, um zumindest punktuell Ursachen- und Wirkungszusammenhänge zu verstehen. Dies an sich ist Bestandteil täglicher Ingenieurpraxis und stellt immer die Frage nach der Sinnfälligkeit der Wahl bzw. Festlegung der Segment- resp. Bilanzgrenzen und der in diesen Segmenten geltenden Stoff- und Randbedingungen.

Jedoch, wie geht man aus Sicht des Ingenieurs mit der Frage nach der „Beherrschung“ wesentlich komplexerer Prozesse als dem dargestellten Klebproblem um?

Beispiel B: Herstellung von Spinnvliesstoffen

Ein Beispiel für einen „komplexen“ Kunststoffverarbeitungsprozess ist die Herstellung von Spinnvliesstoffen, wie sie zum Beispiel als Tuftingträger in Teppichböden, Geotextilien oder als so genannter Nässeschutz in Babywindeln eingesetzt werden.

Spinnvliesstoffe sind aus Endlosfilamenten bestehende textile Flächengebilde, die unmittelbar aus dem polymeren Rohstoff gebildet werden, das heißt Faser- und Flächenerzeugung sind fast zeitgleich (innerhalb einer Sekunde) miteinander integriert [4].

Das Grundprinzip der Spinnvliesstoff-Erzeugung ist in schematisierter Form in Abbildung 3 dargestellt.

In einem als „Spinnturm“ bezeichneten Mehr-Etagen-Gebäude wird das Ausgangspolymer als Granulat eingesetzt, getrocknet, in einem Extruder geschmolzen und auf die zur Verspinnung geeignete Temperatur erhitzt. Mittels Spinnpumpen wird die Schmelze

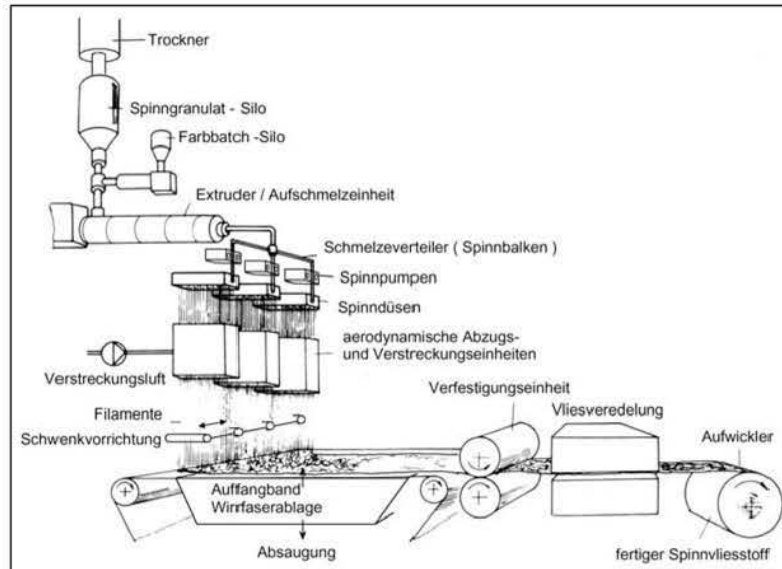


Abbildung 3
Prinzip einer Spinnvliesanlage mit aerodynamischer Faserverstreckung [4]

durch Düsenplatten mit einer Vielzahl feinsten Düsenöffnungen (bis zu 30.000, je nach der gewünschten Vliesbreite) durchgepresst. Das aus der Spinndüse austretende Polymer wird durch ein kompliziertes System nach unten gerichteter Luftströme abgekühlt und damit von der flüssigen in die feste Filamentform überführt. Zusätzlich werden mit hoher Energie parallel zu den Filamenten Luftstrahlen nach unten gerichtet – zum Teil mit Überschallgeschwindigkeit – und bewirken, dass die Filamente in Längsrichtung um ein Vielfaches ihrer Länge verstreckt werden. Nur durch diesen Verstreckungsvorgang, der zu einer Parallelisierung (Orientierung) der Polymerketten führt, erhalten die Endlosfasern ihre typischen textilen Kraft-Dehnungs-Eigenschaften [4].

An den Energiegehalt der Luft und an die Präzision der aerodynamischen Strahlungssysteme werden sehr hohe Anforderungen gestellt, denn Tausende von Einzelfilamenten werden in einem gemeinsamen Luftraum geführt und ohne weitere Kontrollmöglichkeiten innerhalb der gleichen Sekunde auf einem relativ langsam laufenden, breiten Transport-Siebband abgelegt. Wegen der beträchtlich höheren Zufuhrgeschwindigkeit der aufprallenden Filamente bildet sich auf dem Siebband eine schuppenförmig aufeinander liegende wirre Filamentschicht. Das ist der Entstehungszeitpunkt des Spinnvlieses als textiles Flächengebilde [4].

Die noch relativ lockere Faserschicht wird anschließend in einer Verfestigungszone thermisch, mechanisch oder chemisch zu einem homogenen, abriebfesten Spinnvliesstoff fertig gestellt [4].

Zusätzlich können in die gleiche Produktionsstufe auch noch Veredelungsstationen integriert werden, um spezielle Eigenschaften und Oberflächeneffekte zu erzielen, wie beispielsweise Einfärbung, Druck oder Hydrophilierung [4].

Am Ende der Produktionsanlage wird der fertige Spinnvliesstoff mit einer relativ hohen Geschwindigkeit, die bei niedrigen Flächengewichten bis ca. 400 m/min liegt, aufgerollt.

Zielsetzung in diesem Prozess ist es, ein Produkt mit einem definierten Flächengewicht und Vliesmuster sowie meist definierten mechanischen Eigenschaften in Längs- und Querrichtung zu erzeugen.

Wie steht es nun mit den Kausalitäten in diesem komplexen Prozess? Dazu wird die Frage gestellt, welche Prozessparameter in den einzelnen hier hintereinander geschalteten Prozessstufen (d. h. von der Granulatzuführung über deren Trocknung bis zum Produkt auf dem Wickel) theoretisch, das heißt nach bekanntem Wissen, einen Einfluss auf die gewünschte Produktqualität haben könnten, und schreibt man diese zunächst nur auf, so werden diese in der Größenordnung von über 100 sein. Analysiert man dann jedoch, welche eher unwichtig als wichtig sind (basierend auf theoretischem Wissen und Erfahrungswissen), so endet man bei ca. 6 – 7 Kernprozessparametern. Um nun den Prozess beherrschbar zu machen, gilt es, diese Zahl beispielsweise durch Konstanthaltung einzelner Parameter über entsprechende Vorrichtungen (Regler) weiter zu reduzieren.

Denkbar ist an dieser Stelle bereits die Möglichkeit zur Erstellung eines statistischen Prozessmodells zur Beschreibung der Zusammenhänge. Dies scheitert jedoch meist noch an der Zahl der zu variierenden Einflussgrößen und der Zahl der statistisch notwendigen Versuche sowie der Tatsache, dass entsprechende Versuchspunkte aus dem Design of Experiments mit einer produzierenden, industriellen Anlage in der Regel nicht durchführbar sind.

Jedoch erscheint es durchaus möglich, Betriebsergebnisse, das heißt Daten erzielter Produktqualitäten, kontinuierlich gegen die realen Prozessbedingungen zu legen und rein statistisch begründete Zusammenhänge über z. B. Neuronale Netze zu finden. Ist ein solches Netz ausreichend konditioniert, so kann in seiner Beschreibungsgüte durchaus auch ein gut nutzbares Prozessmodell für einen so komplexen Prozess wie die Spinnvliesherstellung entstehen. So wie bei dem ersten Beispiel handelt es sich dann um eine vermeintliche das heißt probabilistische Kausalität.

Letztlich ist dieser gerade geschilderte Prozess vergleichbar mit dem Aufbau von Erfahrungswissen, wie man es bei einigen Anlagenführern in der Praxis oft mit Erstaunen, aber auch mit hoher Achtung wahrnehmen kann. Wäre dies nicht individuell aufgebaut worden und vorhanden, dann gäbe es auch meist keine komplexen und dennoch von Menschen beherrschten Produktionsprozesse.

Jedoch ist es auch im Falle dieser komplexen Prozesse legitim, nach den Möglichkeiten zur physikalischen Modellierung des gesamten Prozesses zu fragen. Teilelemente sind bei Kenntnis der entsprechenden Stoffwerte bereits sehr gut beschrieben, zum Beispiel das Aufschmelzen und die Förderung des Kunststoffes im Extruder oder der Druckaufbau in Zahnradpumpen. Nahezu völlig offen sind jedoch noch die Beschreibung der molekularen Orientierung der Schmelze während des Fließens durch die Anlage sowie im Verstreckprozess nach den Spinndüsen und die hieraus ableitbaren Filamenteigenschaften. Auch wenn dies vorläge, so wäre immer noch unklar, wie die anisotropen Spinnvlieseigenschaften letztlich bei dem chaotischen Prozess der Faserablage auf dem Sieband und der anschließenden Verdichtung und Verfestigung entstehen. Da ein solches physikalisch begründetes, durchgängiges Modell fehlt, wird die Prozessbeherrschung auch in Zukunft wesentlich über individuelle und damit meist unscharfe Modelle, basierend auf Erfahrungswissen, erfolgen. – Die hier geschilderte Problematik gilt übrigens für viele technische Prozesse und stellt wahrlich keine Singularität dar.

Beispiel C: Prognose des Versagens von Faserverbund-Kunststofflaminaten

Wenn, wie bereits angesprochen, ein komplexer Prozess jedoch in Teilelemente zerlegt und diese für sich betrachtet werden oder der Komplexitätsgrad reduziert wird, so lassen sich in der Regel mittels physikalisch-begründeter Modelle klare Zusammenhänge formulieren, die eindeutig kausal sind. Die Herausforderung hierbei liegt jedoch meist in der physikalischen Begründung.

Dies sei an einem Beispiel aus dem Bereich faserverstärkter Kunststoffe diskutiert: Diese Werkstoffe sind in vielen Fällen als ein Verbund von einzelnen faserverstärkten Lagen, so genannte Laminat aufgebaut.

Im Gegensatz zu homogenen Werkstoffen, bei denen es einen dominierenden Versagensmechanismus gibt, muss bei der inhomogenen Struktur von aus Fasern und Matrix bestehenden unidirektional verstärkten Schichten zwischen den zwei grundverschiedenen Versagensarten Faserbruch (FB) und Zwischenfaserbruch (ZFB) unterschieden werden (Abb. 4) [5].

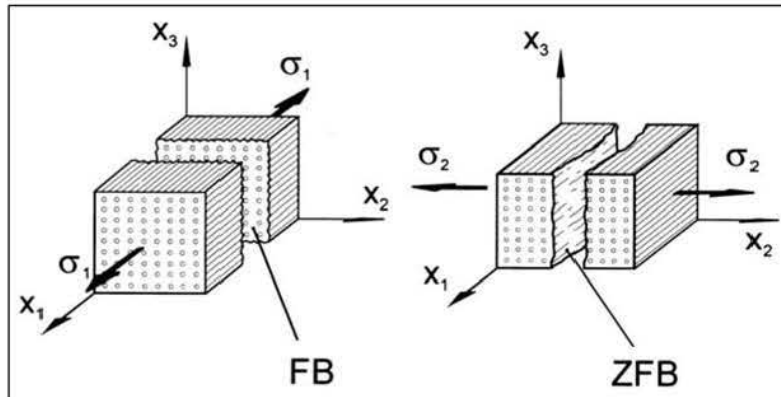


Abbildung 4
Faserbruch (FB) und Zwischenfaserbruch (ZFB) [5]

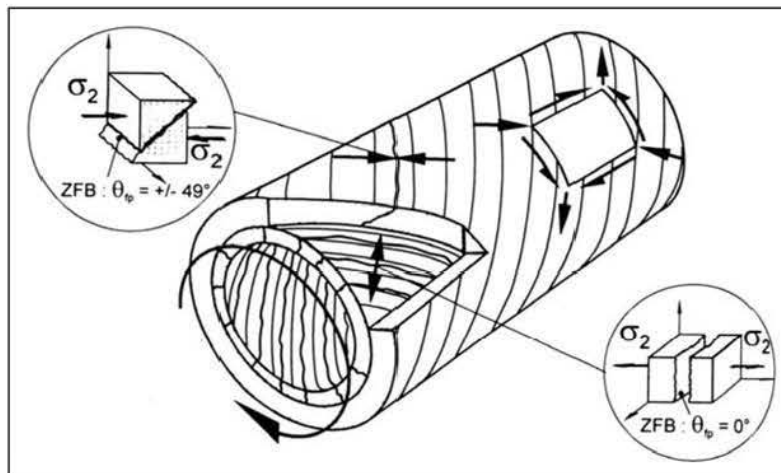


Abbildung 5
Tolerierbare „Zug-ZFB“ und zum Bauteilversagen führender „Druck-ZFB“ in einer Torsionsfeder [5]

Eine weit verbreitete Meinung ist, dass nur FB in mindestens einer Schicht zum Versagen des gesamten Laminates führen kann. Bei der Entwicklung einer hoch beanspruchten GFK-Torsionsfeder, über die Puck in mehreren Arbeiten berichtet hat, zum Beispiel [6, 7], wurde aber die Erfahrung gemacht, dass unter gewissen Umständen ein einzelner ZFB zum Totalversagen des Bauteils führen kann. Das erklärt sich folgendermaßen: In Bild 5

ist eine aus einer inneren -45° -Schicht und einer dickeren äußeren $+45^\circ$ -Schicht bestehende Torsionsfeder abgebildet. Die Torsionsbeanspruchung führt in der inneren Schicht zu Druckspannungen in Faserrichtung und zu Zugspannungen quer zur Faser. Infolge dieser Quer-Zugspannungen treten sehr frühzeitig ZFB in Form von gleichmäßig über dem Umfang verteilter Risse auf, die die innere UD-Schicht in radialer Richtung durchtrennen. Diese ZFB sind für die Bauteilfunktion aber ungefährlich. In der äußeren Schicht hingegen wirken Zugspannungen in Faserrichtung und Druckspannungen senkrecht dazu. Diese Druckspannungen bewirken den in Abbildung 5 skizzierten keilförmigen Bruch, der augenblicklich zu einem Stabilitätsversagen der Feder führt. Dieser aufgrund von Querdruckspannungen auftretende ZFB ist für das Bauteilversagen verantwortlich, weil die schrägen Bruchflächen sich übereinander schieben und dadurch eine Sprengwirkung in radialer Richtung ausüben. Diese Art ZFB ist also gefährlich!

Die augenscheinlich unter etwa 45° verlaufende Bruchebene des ZFB legt die Vermutung nahe, dass es sich um einen Schubbruch handelt. Von dieser Beobachtung ausgehend entwickelte Puck ein neues ZFB-Festigkeitskriterium [8], das auf der Verwendung eines in die sich einstellende Bruchebene drehbaren Koordinatensystems beruht. Hiermit ist es möglich, für jeden beliebigen, aus den fünf möglichen ZFB-verursachenden Spannungen σ_2 , σ_3 , τ_{23} , τ_{31} und τ_{21} kombinierten Spannungszustand die Ebene zu ermitteln, in der die Bruchgefahr am größten ist (Bild 6 rechts). Die auf einer Idee von Hashin [9] und letztendlich auf der Bruchhypothese von Coulomb/Mohr für Sprödbbruch basierende Methode wurde von Puck theoretisch erheblich weiterentwickelt [10]. In der sich einstellenden Bruchebene können nur eine Normalspannung (σ_n) und eine Schubspannung wirken, wobei man die Schubspannung bei UD-FVK sinnvollerweise in eine parallel (τ_{nl}) und eine senkrecht (τ_{nt}) zur Faserrichtung orientierte Komponente zerlegt. Die Interaktion dieser drei Spannungen wird – getrennt für σ_n -Zug und σ_n -Druck – vom Puck-ZFB-Festigkeitskriterium beschrieben. Hierbei stellt Puck die Frage: „Welche Höhe einer Spannungscombination σ_n , τ_{nt} , τ_{nl} erträgt die gemeinsame Wirkebene dieser Spannungen, bis sie bricht?“

Zur Beantwortung dieser Frage werden die maßgeblichen Spannungen geeignet in einem mathematischen Polynom zusammengefasst. Zu einer anschaulichen Darstellung gelangt man, wenn man dieses Polynom als die Oberfläche eines Bruchkörpers interpretiert (siehe Abb. 7) [11].

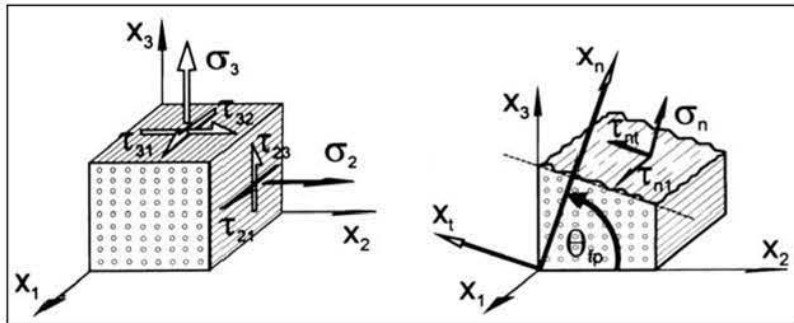


Abbildung 6
ZFB verursachende Spannungen und resultierende Bruchebenen [5]

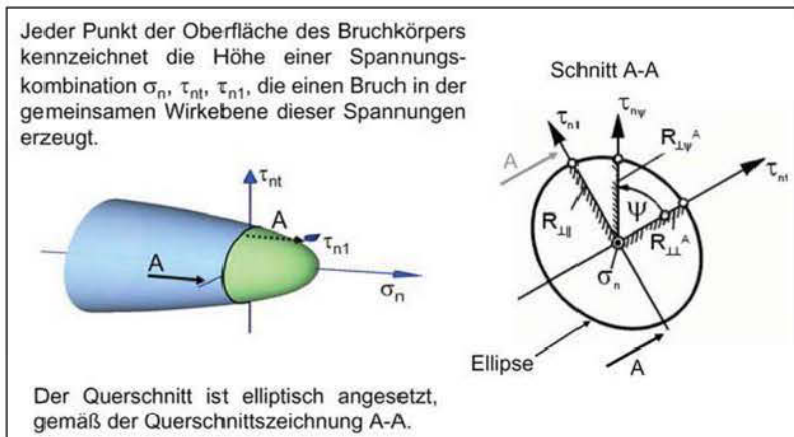


Abbildung 7
Darstellung der wirkebenebezogenen Bruchbedingung als Bruchkörper [11]

Die Koordinaten von Punkten dieser Oberfläche kennzeichnen also Kombinationen von Spannungen, die zusammen einen Bruch in ihrer gemeinsamen Wirkebene erzeugen. Zu beachten ist, dass die Ankerpunkte eines solchen Bruchkörpers durch die maximal von der Wirkebene ertragbaren Spannungen σ_n oder τ_{nt} oder τ_{n1} , gebildet werden. Puck definiert dies als „Bruchwiderstände der Wirkebene“ und erläutert ergänzend: Unter einem Wirkebene-Bruchwiderstand RA versteht man die Höhe derjenigen Normalspannung σ_n oder reinen Schubspannung τ_{nt} bzw. τ_{n1} , die nötig wäre, um in ihrer Wirkebene einen Zugbruch bzw. Scherbruch zu erzeugen.

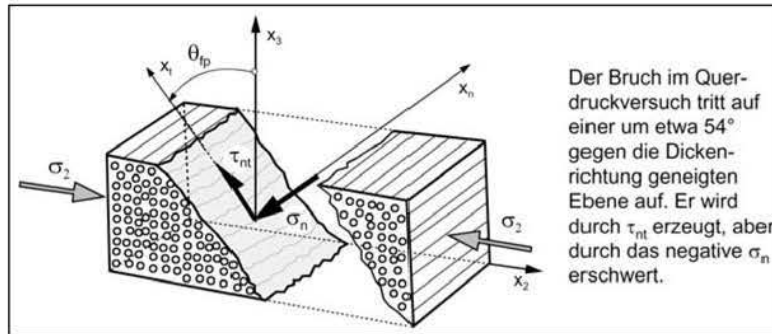


Abbildung 8
Wirkebene des Bruchs unter fasersenkrechter Druckbeanspruchung [11]

Die Nützlichkeit diese Anschauungen und Modellbildungen erschließt sich etwa, wenn man der Frage nachgeht, unter welchem Bruchwinkel eine unidirektionale Einzelschicht unter Querdrukspannung versagt. Versagensauslösend ist hier die Schubspannung τ_{nt} , durch die gleichzeitig einwirkende negative Normalspannung σ_n wird der Bruch erschwert. Die rechnerisch wie im Experiment nachgewiesene Wirkebene für diesen Bruch liegt bei etwa 54° (Abb. 8). Bei dieser Betrachtung wird deutlich, dass die gerne als Kennwert gemessene Druckfestigkeit einer unidirektionalen Einzelschicht im Querdrukversuch nicht wirklich ein elementarer Werkstoffkennwert ist, sondern das Bruchgeschehen in der Interaktion von Schub- und Drucknormalspannungen in der Bruchwirkebene beschreibt.

In enger Zusammenarbeit mit Prof. Puck wurden am IKV umfassende Forschungsarbeiten zur experimentellen Überprüfung der hier geschilderten Modellvorstellungen und zur Ermittlung zugehöriger Werkstoffkennwerte ausgeführt [12–15]. Diese physikalisch-begründete Modellvorstellung hat sich experimentell zweifelsfrei bestätigt und findet zunehmend weltweit Anwendung bei der Festigkeitsanalyse von Faserverbundkunststoff-Laminaten.

Wir sprechen bei diesem Ansatz von einem physikalisch-begründeten Modell zur Beschreibung des Versagensverhaltens. Wird hierunter verstanden, dass man bei beliebiger Faserwahl, Kunststoffmatrix und Faservolumengehalt unmittelbar das Versagensverhalten prognostizieren kann, so fühlt man sich getäuscht, denn die Bruchebenenwiderstände, das heißt die Kontur des Versagenskörpers, muss man erst in sehr aufwendigen Versuchen messen. Eine durchgängige Beschreibung der Zusammenhänge, das heißt eine Modellierung über verschiedene Skalenebenen ist auch bei diesem Problem noch nicht erfolgt. Dennoch ist das Modell erfolgreich.

Auch bleiben hier weitere bedeutende Fragen offen, vor allem bezüglich der Vorausberechnung der Spannungsentwicklung in einem Laminat bei sukzessivem Bruchverhalten, das heißt wenn der Werkstoff zunehmend degradiert aufgrund lokalen Versagens durch Faser- bzw. Zwischenfaserbruch. Hier muss man dann wieder den zunächst kausal erscheinenden Zusammenhang verlassen und zum Beispiel über empirisch ermittelte Abminderungsfaktoren das Versagensverhalten in seiner zeitlichen Entwicklung zu beschreiben versuchen.

Beispiel D: Qualitätsüberwachung bei der Formteilherstellung

Betrachtet man ein beliebiges Kunststoffformteil, so lassen sich meist sehr viele Qualitätsmerkmale wie Abmaße, Gewicht, Verzug, Oberflächenglanz, Festigkeit, Haptik etc., festmachen. Im Herstellungsprozess gilt es nun, diese reproduzierbar, das heißt von Formteil zu Formteil sicher einzuhalten. Dazu benötigt man Kenntnisse über den Einfluss der Fertigungsparameter (letztlich Maschineneinstellung) auf die einzelnen Qualitätsmerkmale. Solche Modelle gibt es jedoch für die meisten Qualitätsmerkmale nicht in unmittelbar physikalisch begründeter Form. Ursachen hierfür sind fehlende Modelle, aber auch die Tatsache, dass Qualitätsmerkmale wie Haptik des Formteils oder auch der Glanz nicht oder auch nur ansatzweise vorausberechenbar sind.

Wie kommt man aber nun zu einem Prozessmodell für ein beliebiges Qualitätsmerkmal, welches letztlich auch zur On-line Qualitätsüberwachung oder gar zur Prozessregelung genutzt werden kann? Kann man hier Kausalitäten ermitteln und beschreiben?

Die Vorgehensweise zur Gewinnung eines solchen Modells ist in Abbildung 9 dargestellt. Ausgehend von vorhandenem Prozesswissen, zum Beispiel beim Maschineneinrichter, wird ein statistischer Versuchsplan erstellt. Dieser beschreibt die in einer Versuchsphase zu variierenden Maschineneinstellparameter. Die Variationsbreiten der einzelnen Parameter müssen die in der Produktion auftretenden Prozessschwankungen abdecken. Während der Versuchsdurchführung werden die Prozessgrößen (z. B. Drücke und Temperaturen sowie Maschinenbewegungen) erfasst und aufgezeichnet. Parallel werden die Formteile entnommen, eindeutig gekennzeichnet und ihre Qualität bestimmt [16].

Aus den gemessenen Prozesskurvenverläufen werden Kennzahlen berechnet, da eine Verarbeitung des gesamten aufgenommenen Kurvenverlaufs meist nicht möglich und auch nicht notwendig ist.

Nach der Versuchsphase folgt die Modellbildungsphase, in der der Zusammenhang zwischen den Qualitätsmerkmalen und den berechneten Kenngrößen mathematisch erfasst wird. Die Modellbildung erfolgt heute meist mit Regressionsanalysen. Zunehmend

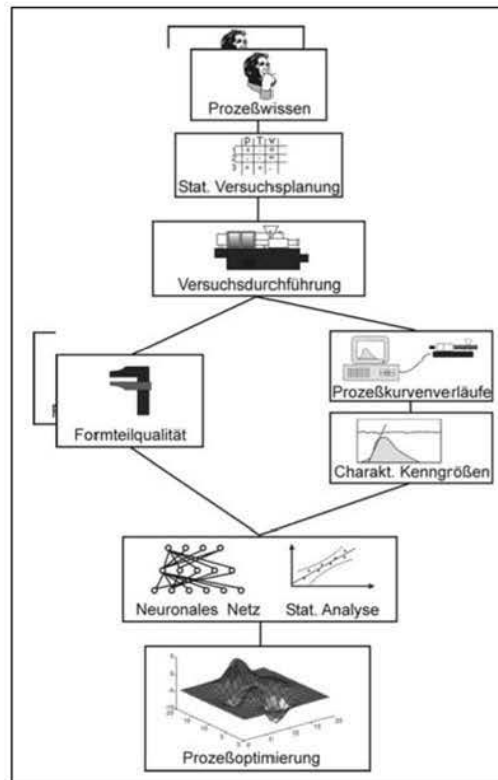


Abbildung 9
Vorgehensweise zur Bildung von Prozessmodellen [16]

werden diese durch Algorithmen aus dem Forschungsbereich der künstlichen Intelligenz ersetzt. Künstliche Neuronale Netzwerke sind in der Lage, aus Beispielen zu lernen und nicht-lineare Abhängigkeiten abzubilden.

Ist der Zusammenhang zwischen den Kenngrößen und den Qualitätsmerkmalen statistisch ausreichend abgesichert, können diese für eine On-line Prozessüberwachung genutzt werden. Dabei werden wie in der Versuchsphase die Prozessgrößen gemessen und Kennzahlen berechnet. Mit Hilfe des mathematischen Modells wird direkt nach beendeter Herstellung eines Kunststoffteils (d. h. nach Zyklusende) die Qualität berechnet und protokolliert. Durch Vergleich mit den Sollwerten kann über die Gesamtqualität entschieden werden und mittels einer Ausschussweiche können automatisch die Formteile, die nicht den Qualitätsanforderungen entsprechen, aussortiert werden.

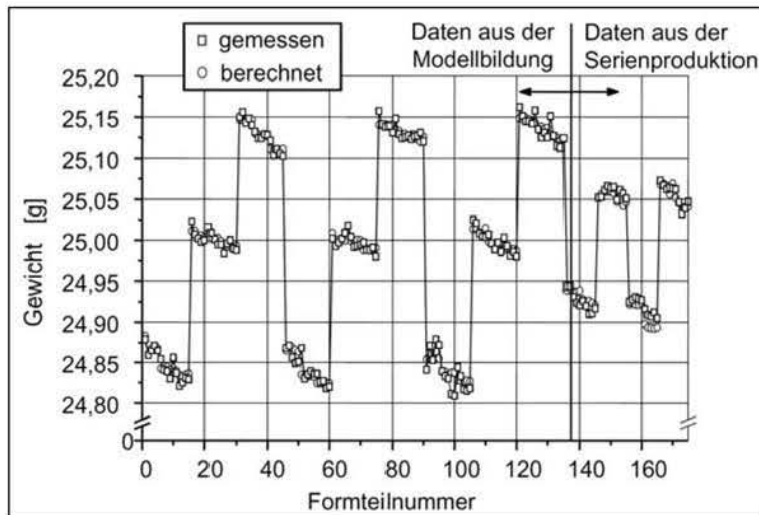


Abbildung 10
Vergleich berechnetes und gemessenes Gewicht für ein Großserienbauteil [16]

Neben der Qualitätsüberwachung kann mit Hilfe der Versuchsergebnisse durch Korrelation der Maschineneinstellparameter mit den Qualitätsmerkmalen eine Prozessoptimierung durchgeführt werden.

Abbildung 10 zeigt die exemplarische Vorhersage des Gewichts eines spritzgegossenen Großserienbauteils aus der Automobilindustrie. Dargestellt sind die gemessenen und berechneten Gewichte über der Zykluszahl. Die Daten mit einer Formteilnummer kleiner als 135 sind zur Modellbildung mittels Neuronaler Netzwerke verwendet worden, die mit einer Nummer größer als 135 sind Daten aus der Serienproduktion. Deutlich ist die große Übereinstimmung (Güte: 99,8 %) zwischen gemessenen und berechneten Werten zu erkennen. Dies ist ein Beispiel für die Nutzung einer probabilistischen Kausalität zur Prozessführung.

Mit Hilfe der On-line Prozessüberwachung ergibt sich eine Verschiebung der Produktionskontrolle von einer reinen Endkontrolle zu einer unmittelbaren Kontrolle im Prozess mit verbesserten Kontroll- und Eingriffsmöglichkeiten. Denn es ist durchaus möglich, bereits über die gemessenen und berechneten Kennwerte unmittelbar eine Aussage über die Eigenschaften des Formteils zu machen, ohne dass man es schon gesehen hat (denn es ist noch in der Maschine) und ohne dass man es gar geprüft hat! Voraussetzung sind natürlich hierbei statistisch abgesicherte Korrelationen.

Jedoch sollte man bei diesem Ansatz die physikalische Plausibilität der gefundenen statistischen Korrelationen nicht hinterfragen wollen. Man wird keine zufrieden stellende Antwort erhalten. Hier wäre dieser methodische Ansatz völlig überfordert.

Dennoch, er hilft heute in der täglichen Technik maßgeblich. Ein Ingenieur darf an dieser Stelle dann durchaus zufrieden sein; dies zumindest bis zur nächsten Herausforderung!

4 Fazit

Die dargestellten Beispiele verdeutlichen das Dilemma, in welchem ein Ingenieur – und nicht nur der der Kunststofftechnik – steckt. So wünschenswert eine durchgängige Beschreibung der Zusammenhänge von Ursache und Wirkung letztlich wäre, liegt diese jedoch für reale technische Prozesse mit all ihren meist im physikalischen Sinne nicht immer eindeutig definierten und eingehaltenen Werten und ihren oft unbekanntem, schwer in ihrer Auswirkung bewertbaren Störgrößen nicht vor. Eindeutige und klare Kausalketten sind aufgrund der Komplexität der Prozesse meist nicht identifizierbar.

Das Gesamtverständnis, das man von diesem Prozess erlangt, setzt sich letztlich meist aus dem tieferen Verständnis von Teilelementen des Prozesses zusammen, wobei in vielen Fällen deren Kopplung unbeantwortet bleibt.

Auch wenn dies derzeit noch so ist, so hilft bereits dies weiter. Der Siegeszug der Simulation in weiten Technikbereichen hat dies zweifelsfrei belegt. Auch die statistischen Ansätze haben große Bedeutung für die Prozessführung. Denn letztlich gilt, wie C.G. Jung richtig bemerkt: „Wirksam ist, was wirkt. Das müssen diejenigen, die immer nach der objektiven Wahrheit rufen, schmerzhaft erfahren“.

5 Literatur

- [1] N.N.: Wissenschaftlicher Arbeitskreis Kunststofftechnik, 1999, www.wak-kunststofftechnik.de.
- [2] Basso, L., Winterbottom, A. & H. P. Wynn: A Review of the Taguchi Methods for off-line Quality Control. In: *Quality and Reliability Int.* 2 (1986), S. 71–79.
- [3] Michaeli, W. & E. Schmachtenberg: Herausforderungen der Kunststofftechnik an die Ingenieurwissenschaften, Plenarvortrag I, 21. Internationales Kunststofftechnisches Kolloquium des IKV, Aachen, 2002.

- [4] Wuttke, G.: Auswirkungen produktionstechnischer Veränderungen auf die Unternehmensführung, dargestellt am Beispiel der Spinnvliesstoff-Industrie. In: Kreikebaum, H. et al. (Hg.), Industriebetriebslehre in Wissenschaft und Praxis, Berlin: Duncker & Humblot, 1985.
- [5] Huybrechts, D., Kopp, J., Kocker, K., Krusche, T. & J. Blaurock: Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffe – Neues zur Auslegung, Prüfung und Prozessüberwachung, Tagungsumdruck, 18. Intern. Kunststofftechn. Kolloquium des IKV, Aachen, 1996.
- [6] Puck, A.: Einwicklung von GFK-Drehrohrfedern. In: Ingenieur-Werkstoffe 3 (1991) 6, S. 66–67
- [7] Garbe, J. & A. PUCK: Erfahrungen mit Bruchkriterien an schwellend belasteten GFKDrehfedern. In: Kunststoffe 83 (1993) 5, S. 406–411.
- [8] Puck, A.: Ein Bruchkriterium gibt die Richtung an. In: Kunststoffe 82 (1992) 7, S. 607–610.
- [9] Hashin, Z.: Failure criteria for unidirectional fiber composites. In: Journal of Applied Mechanics 47 (1981) 6, S. 329–334.
- [10] Puck, A.: Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten – Realistische Bruchkriterien und Degradationsmodelle, München: Hanser Verlag, 1995
- [11] Schmachtenberg, E.: Faserverstärkte Kunststoffbauteile – Sichere Auslegung, schnelle Herstellung, Plenarvortrag III, 23. Internationales Kunststofftechn. Kolloquium des IKV, Aachen, 2006.
- [12] Huybrechts, D. G.: Ein erster Beitrag zur Verifikation des wirkebenenbezogenen Zwischenfaserbruchkriteriums nach Puck, Technisch-wissenschaftlicher Bericht, Aachen: Verlag der Augustinus-Buchhaltung, 1996.
- [13] Kopp, J. W.: Zur Spannungs- und Festigkeitsanalyse von unidirektionalen Faserverbundkunststoffen, Technisch-wissenschaftlicher Bericht, Aachen: Verlag Mainz, 2000.
- [14] Knops, M.: Sukzessives Bruchgeschehen in Faserverbundlaminaten, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation 2003.
- [15] Fischer, O.: Faserbruchgeschehen in kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen, Technisch-wissenschaftlicher Bericht, Aachen: Verlag Mainz, 2003.
- [16] Gierth, M.: Methoden und Hilfsmittel zur Prozessnahen Qualitätssicherung beim Spritzgießen von Thermoplasten, Dissertation, RWTH Aachen, 1992.

Autoren

Bergmeister, Konrad, Prof. Dr., geb. 1959; Ordentlicher Professor für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität für Bodenkultur, Wien, Vorstand – Brenner Basistunnel – BBT SE; Hauptfachrichtung: Konstruktiver Ingenieurbau; dienstlich: Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 Wien, Tel.: 00 43/1/4 76 54 52 50, Fax: 00 43/1/4 76 54 52 99, e-mail: konrad.bergmeister@boku.ac.at

Dössel, Olaf, Prof. Dr. rer. nat., geb. 1954; Universitätsprofessor, Leiter des Instituts für Biomedizinische Technik der Universität Karlsruhe (TH); Hauptfachrichtung: Elektrotechnik, Biomedizinische Technik; dienstlich: Universität Karlsruhe, Institut für Biomedizinische Technik, Kaiserstraße 12, 76128 Karlsruhe, Tel.: 07 21/6 08 26 50, Fax: 07 21/6 08 27 89, e-mail: olaf.doessel@ibt.uni-karlsruhe.de

Hüttl, Reinhard F., Prof. Dr., geb. 1957; Wissenschaftlicher Vorstand und Vorstandsvorsitzender des GeoForschungsZentrums Potsdam, Leiter des Lehrstuhls für Bodenschutz und Rekultivierung der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus; Hauptfachrichtung: Umweltwissenschaften/Forstwissenschaften; dienstlich: GeoForschungsZentrum Potsdam, Telegrafenberg Haus G, 14473 Potsdam, Tel.: 03 31/2 88 10 00, Fax: 03 31/2 88 10 02, e-mail: huettl@gfz-potsdam.de und Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Fakultät 4: Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik, Lehrstuhl für Bodenschutz und Rekultivierung, Konrad-Wachsmann-Allee 6, 03046 Cottbus, Tel.: 03 55/69 21 17, Fax: 03 55/69 23 23, e-mail: huettl@tu-cottbus.de, Internet: www.tu-cottbus.de/Bodenschutz

Klocke, Fritz, Prof. Dr., geb. 1950; Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren und Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik; Hauptfachrichtung: Produktionstechnik, Fertigungstechnik; dienstlich: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Werkzeugmaschinenlabor, Lehrstuhl für Technologie und Fertigungsverfahren, Steinbachstraße 19, 52074 Aachen, Tel.: 02 41/8 02 74 01, Fax: 02 41/8 02 23 59, e-mail: f.klocke@wzl.rwth-aachen.de, Internet: www.wzl.rwth-aachen.de

Lucas, Klaus, Prof. Dr.-Ing., geb. 1943; Universitätsprofessor; Hauptfachrichtung: Thermodynamik; dienstlich: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, Schinkelstraße 8, 52062 Aachen, Tel.: 02 41/8 09 53 80, Fax: 02 41/8 09 22 55, e-mail: lucas@ltt-rwth-aachen.de

Mewes, Dieter, Prof. Dr., geb. 1940; Universitätsprofessor für Verfahrenstechnik i. R., ehemaliger Direktor des Instituts für Verfahrenstechnik; Hauptfachrichtung: Verfahrenstechnik; privat: Brennenhorst 1, 30853 Langenhagen, Tel.: 05 11/77 58 38, Fax: 05 11/7 62 30 31, e-mail: mewes@ifv.uni-hannover.de

Michaeli, Walter, Prof. Dr., geb. 1946; Universitätsprofessor für Kunststoffverarbeitung und Leiter des Instituts für Kunststoffverarbeitung; Hauptfachrichtung: Kunststofftechnik; dienstlich: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Institut für Kunststoffverarbeitung, Pontstraße 49, 52062 Aachen, Tel.: 02 41/8 09 38 38, Fax: 02 41/8 09 22 62, e-mail: zekorn@ikv.rwth-aachen.de

Renn, Ortwin, Prof. Dr. rer. pol., geb. 1951; Ordinarius für Technik- und Umweltsoziologie an der Universität Stuttgart, Direktor des Interdisziplinären Forschungsschwerpunktes Risiko und Nachhaltige Technikentwicklung am Internationalen Zentrum für Kultur- und Technikforschung (ZIRN) und Geschäftsführer des gemeinnützigen Forschungsinstituts „DIALOGIK gGmbH“; Hauptfachrichtung: Risiko- und Umweltsoziologie, Technikfolgenabschätzung; dienstlich: Universität Stuttgart, Institut für Sozialwissenschaften V, Seidenstraße 36, 70174 Stuttgart, Tel.: 07 11/68 58 39 70, Fax: 07 11/68 58 24 87, e-mail: ortwin.renn@soz.uni-stuttgart.de

Scholz-Reiter, Bernd, Prof. Dr., geb. 1957; Geschäftsführender Direktor am Bremer Institut für Betriebstechnik und angewandte Arbeitswissenschaft (BIBA), Lehrstuhlinhaber für Planung und Steuerung produktionstechnischer Systeme an der Universität Bremen; Hauptfachrichtung: Produktionswissenschaft; dienstlich: Universität Bremen/BIBA, FB Produktionstechnik, FG Planung und Steuerung, produktionstechnischer Systeme, Hochschulring 20, 28359 Bremen. Tel.: 04 21/2 18 56 26, Fax: 04 21/2 18 56 40, e-mail: bsr@biba.uni-bremen.de, Internet: www.biba.uni-bremen.de

Schubert, Helmar, Prof. Dr., geb. 1939; Ordinarius i. R.; Hauptfachrichtung: Lebensmittelverfahrenstechnik; dienstlich: Universität Karlsruhe (TH), Institut für Bio- und Lebensmitteltechnik, 76131 Karlsruhe, Tel.: 07 21/6 08 65 37, Fax: 07 21/6 08 83 03, e-mail: helmar.schubert@lvt.uni-karlsruhe.de, Internet: www.lvt.uni-karlsruhe.de

Tervo, Jan Topi, Dipl.-Phys., geb. 1978; Wissenschaftlicher Mitarbeiter am BIBA im Forschungsbereich Intelligente Produktions- und Logistiksysteme; Hauptfachrichtung:

Physik; dienstlich: Bremer Institut für Betriebstechnik und angewandte Arbeitswissenschaft (BIBA) an der Universität Bremen, Hochschulring 20, 28359 Bremen, Tel.: 04 21/2 18 97 92, Fax: 04 21/2 18 56 40, e-mail: ter@biba.uni-bremen.de

Wagemann, Hans-Günther, Prof. Dr., geb. 1935; Universitätsprofessor für Halbleitertechnik; Hauptfachrichtung: Halbleitertechnik, Festkörperelektronik und Festkörperphysik; privat: Biberacher Weg 9, 12247 Berlin, Tel.: 0 30/7 74 85 57, e-mail: wagemann-berlin@t-online.de

