

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].

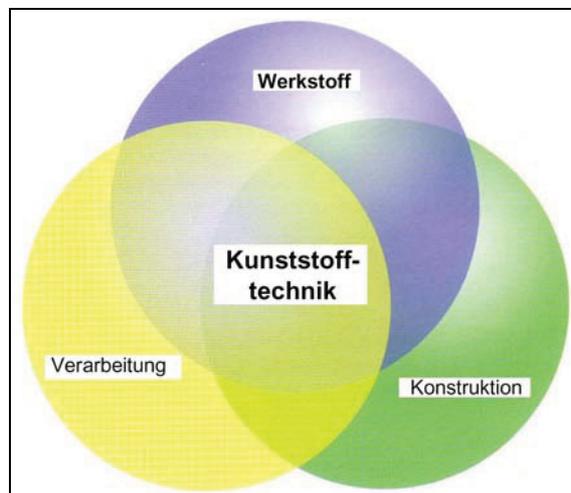


Abbildung 1
Elemente der Kunststofftechnik (WAK Broschüre) [1]

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.

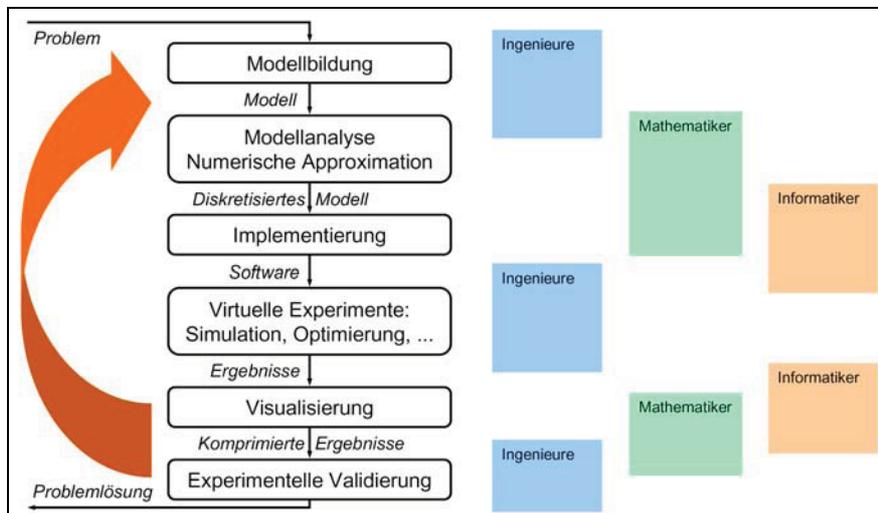


Abbildung 2

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

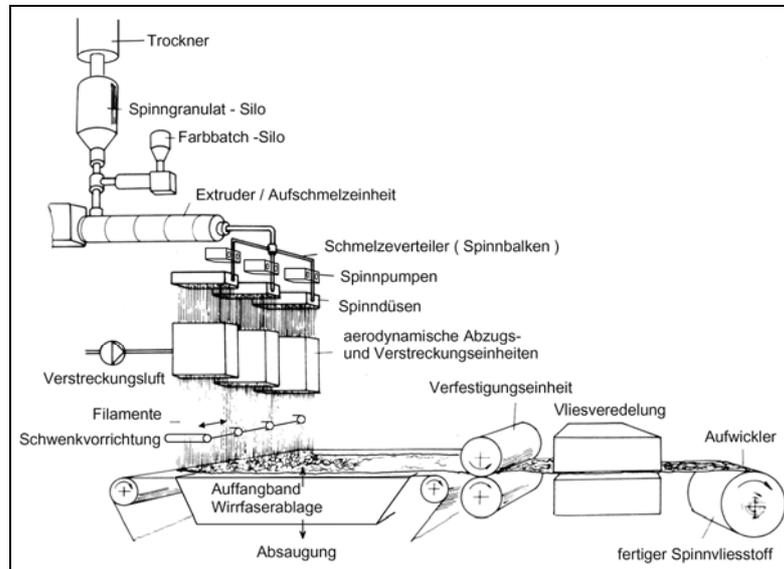


Abbildung 3
Prinzip einer Spinnvliesanlage mit aerodynamischer Faserverstreckung [4]

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 Veredlungsstationen 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-Kunststofflaminate

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 Laminate 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].

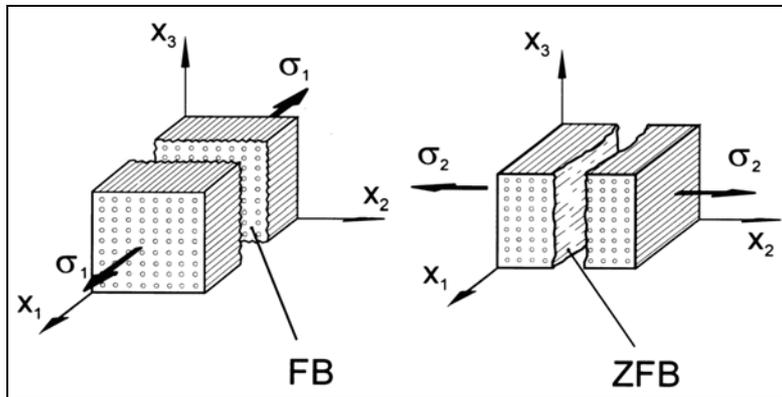


Abbildung 4
Faserbruch (FB) und Zwischenfaserbruch (ZFB) [5]

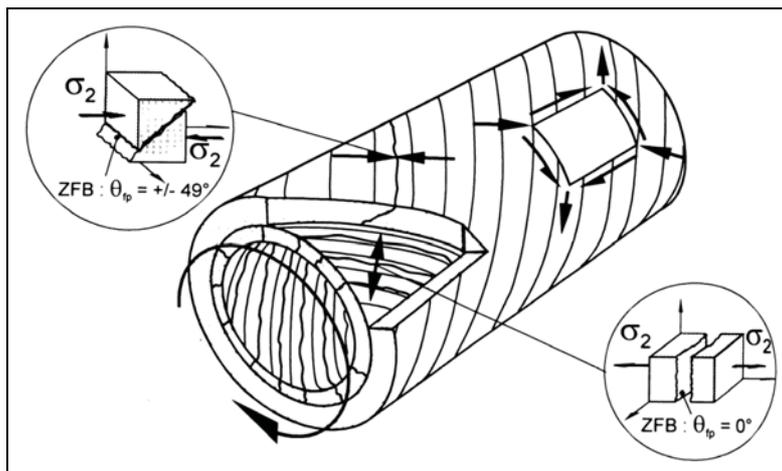


Abbildung 5
Tolerierbare „Zug-ZFB“ und zum Bauteilversagen führender „Druck-ZFB“ in einer Torsionsfeder [5]

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 Querdrukspannungen 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 Spannungskombination 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].

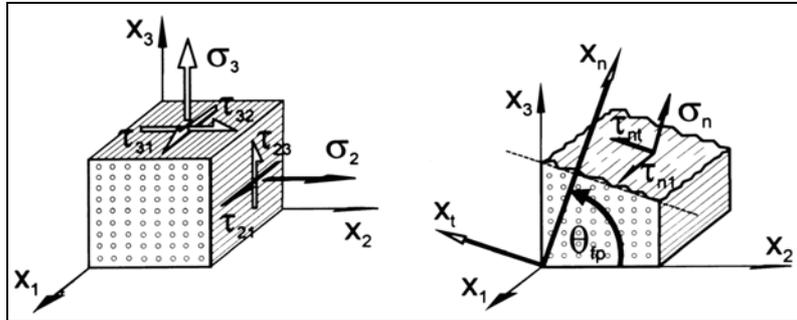


Abbildung 6
ZFB verursachende Spannungen und resultierende Bruchebenen [5]

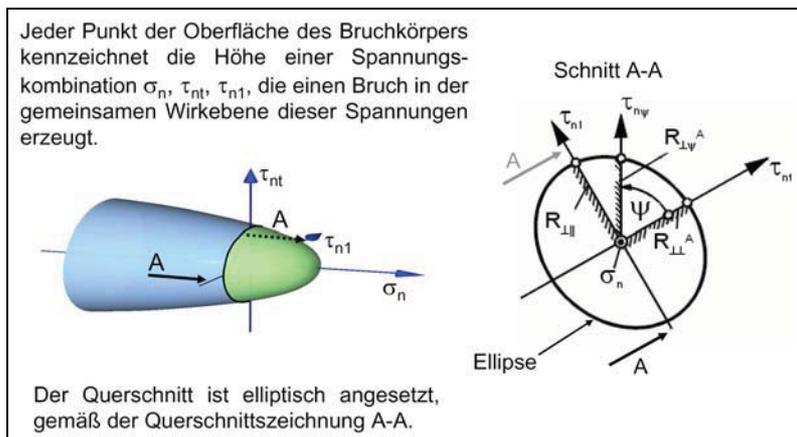


Abbildung 7
Darstellung der wirkebenebezogenen Bruchbedingung als Bruchkörper [11]

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 R_A 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.

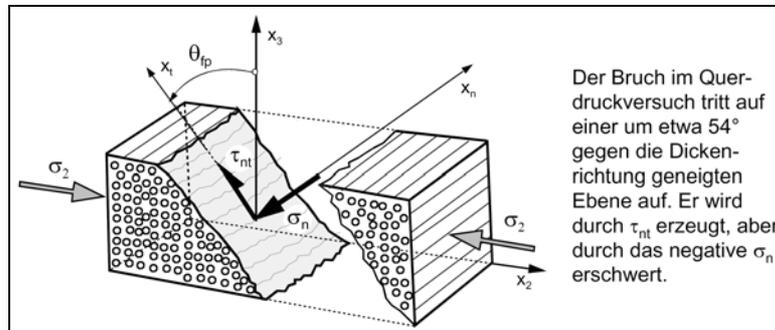


Abbildung 8
Wirkebene des Bruchs unter fasersenkrechter Druckbeanspruchung [11]

Die Nützlichkeit diese Anschauungen und Modellbildungen erschließt sich etwa, wenn man der Frage nachgeht, unter welchem Bruchwinkel eine unidirektionale Einzelschicht unter Querdruckspannung 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 Querdruckversuch 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

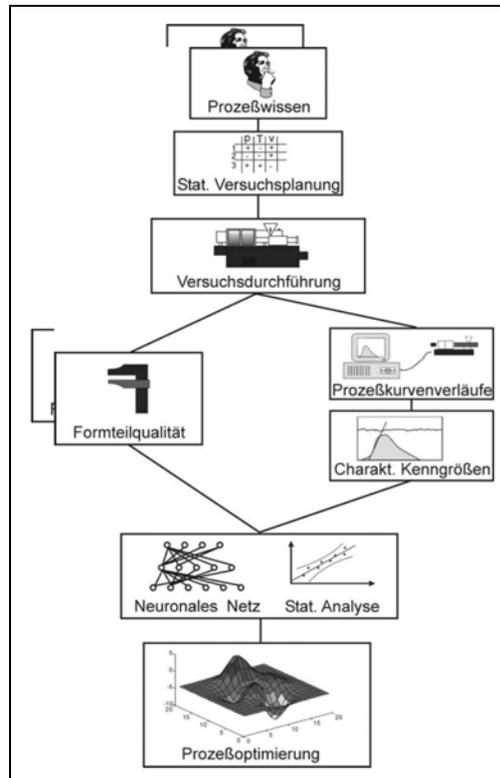


Abbildung 9
Vorgehensweise zur Bildung von Prozessmodellen [16]

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.

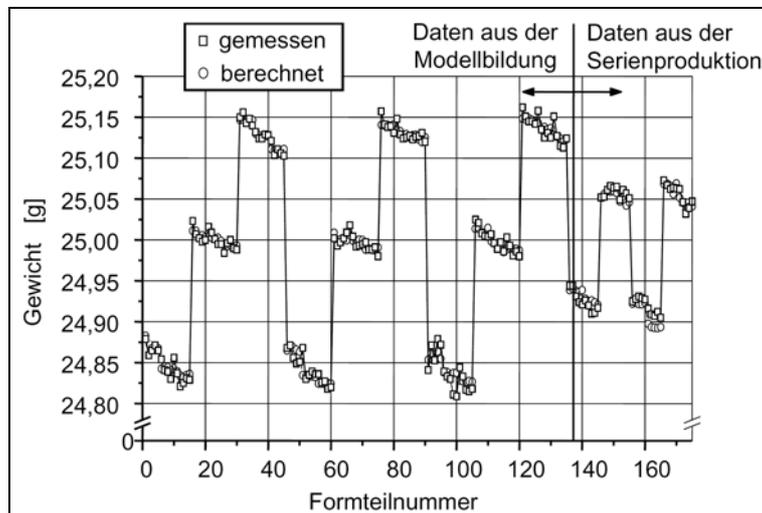


Abbildung 10
Vergleich berechnetes und gemessenes Gewicht für ein Großserienbauteil [16]

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.

