

*Bei der überwiegenden Anzahl der Industrieprodukte entfällt ein großer Teil der Herstellungskosten auf das Material. Ein werkstoffgerechtes Design – die werkstoff- und verarbeitungsgerechte Konstruktion der Bauteile – ist deshalb häufig auch der Schlüssel zum wirtschaftlichen Erfolg eines Produkts.*

# Vom Material zum Produkt

**Der Prozess der Werkstoffoptimierung**  
 Von Ernst Schmachtenberg

Dieser Beitrag ist aus der Sicht des Ingenieurs geschrieben. Wir gestalten unsere materielle Umwelt. In meinem Berufsfeld, dem Maschinenbau, gestalten wir die Welt der industriellen Produktion, der Produktionstechniken, aber auch die der hier erzeugten Produkte.

Erfolgreiches Handeln von Ingenieuren misst sich am Erfolg des Produktes. Nicht immer zu unserer Freude wird dieser Erfolg grundsätzlich am Maßstab des wirtschaftlich erfolgreichen Produktes ermittelt.

Zahlreich sind die Beispiele des *Overengineering*, der technisch zu aufwendigen Gestaltung eines Produktes, dem dann der kommerzielle Erfolg versagt bleibt. Oder in einfachen Worten, so wie ich es gerne versuche, meinen Studenten zu erklären: „Eine Möglichkeit für ein rostfreies Auto, wäre die Verwendung von Goldblechen. Allein, wer könnte das bezahlen?“

Es ist offensichtlich, dass der Ingenieur stets das Optimum zwischen Aufwand und Nutzen suchen muss. Deshalb ist ja auch die wichtigste

Ernst Schmachtenberg, Foto: Tilo Karl



Kennzahl in den Ingenieurwissenschaften der Wirkungsgrad, das Verhältnis des Nutzens eines Systems bezogen auf den in das System eingebrachten Aufwand. Im heute globalen Wettbewerb der Märkte und Produkte erfolgen die Optimierungsschritte in immer schnelleren Innovationszyklen. Dabei verfolgen wir die Strategie, durch Optimierung der Werkstoffe, Konstruktion und Fertigung bestehende Funktionalität kostengünstiger herzustellen und zugleich neue Funktionalität in das Produkt zu integrieren.

Hieraus leitet sich auch unser Interesse an der Materialwissenschaft ab. Materialien die wir zur Produktion verwenden, bezeichnen wir als Werkstoffe. In der Produktion entstehen aus diesen Werkstoffen Werkstücke (als Synonym auch: Bauteile), und schließlich in der Zusammensetzung verschiedener Werkstücke das Produkt, etwa ein Bügeleisen (... das heute vor allem aus Kunststoff und Aluminium besteht. Brauchen wir auch mehr Ordnung in unserer Sprache?) Materialwissenschaft und Werkstofftechnik sind sozusagen die Begriffsgegenpole für das in diesem Heft betrachtete Gebiet, jeweils aus der Blickrichtung des Naturwissenschaftlers und des Ingenieurs. So unterschiedlich die Begriffe, so unterschiedlich ist auch die Forschungskultur der hier engagierten Disziplinen:

- Für den naturwissenschaftlich orientierten Materialwissenschaftler stehen die Erkenntnisse über die Eigenschaften von Materialien im Vordergrund. Hier werden die Modelle und Gesetze zur Erklärung des Aufbaus der Materie entwickelt. Ich nenne dies gerne die „Ideologie der Materialien“.
- Für den werkstofftechnisch orientierten Ingenieur steht die Anwendung und damit der konstruktive Umgang mit den Eigenschaften von Werkstoffen im Vordergrund. Wir wenden die Modelle und Gesetze der Materialwissenschaften an, um aus Materialien Produkte zu formen.

„Materialpragmatiker“ wäre wohl ein passender Begriff.

Wo liegt der Reiz der Werkstofftechnik, was hat dies noch mit Wissenschaft zu tun? Und wie ergeben sich die Wechselwirkungen zwischen Materialwissenschaft und Werkstofftechnik?

Lassen Sie mich zunächst eine Lanze brechen für die Ingenieurwissenschaft. Dazu möchte ich die Frage erörtern, wo ingenieurmäßiges Handeln, also die zweckorientierte Vorgehensweise, zu einem optimierten Produkt zu gelangen und wissenschaftliches Arbeiten, also die systematisierte Vorgehensweise, durch Modellbildung und Experiment zum Verstehen der Wirkungszusammenhänge des betrachteten Systems zu kommen, verknüpft sind.

Wie könnte die Vorgehensweise eines erfolgreichen Produktentwicklers sein? Nun, er könnte voller Intuition und Kreativität stecken. Er hätte dann plötzlich eine Eingabe, würde mit den Fingern schnippen und schon entstünden vor seinem geistigen Auge die Pläne und Konstruktionszeichnungen für ein neues Produkt. Ich denke, diese Vorstellung dürfte noch nicht einmal für eine schlechte amerikanische Filmkomödie taugen.

Tatsächlich ist heute die Komplexität des Produktes so umfassend – man denke hier nur an die verwendeten Herstellungstechniken und Werkstoffe –, dass im industriellen Prozess der Produktentwicklung eine Vielzahl von Spezialisten in ein Entwicklungsteam zu integrieren sind. Damit wird die Frage der Interaktion zwischen Spezialisten und Entwicklungsteams, die hierzu erforderliche Festlegung der Ziele und Termine, die Bereitstellung der erforderlichen Ressourcen und die Verfolgung der Zielerreichung neben der kreativen Einzelleistung der Beteiligten zu wesentlichen Elementen einer erfolgreichen Produktentwicklung.

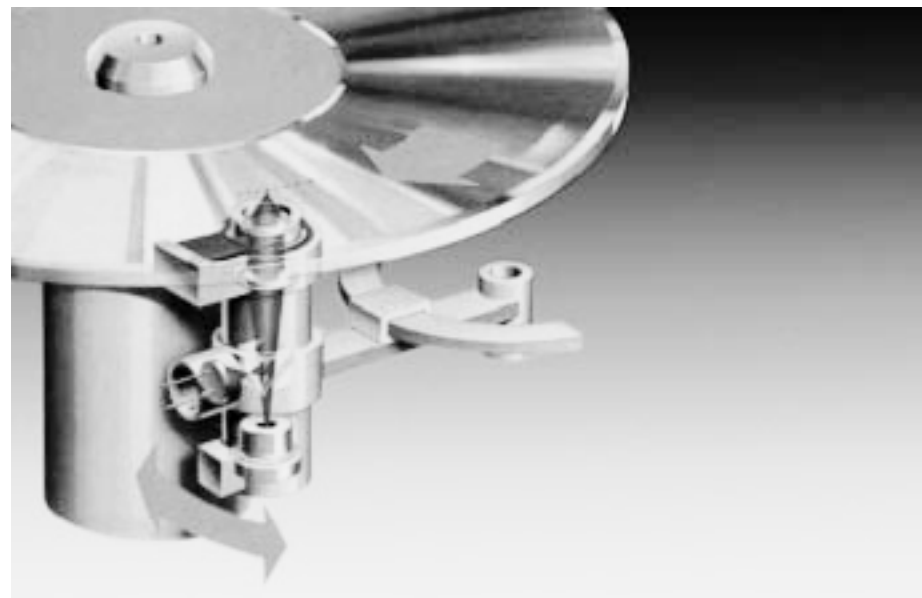
In den frühen Phasen der Produktentwicklung, noch lange bevor

das erste Bauteil gefertigt wird, will man die Eigenschaften des Produktes vorhersagen. Durch Modellbildung und Simulation werden die theoretischen Grundlagen einer solchen Prognose gelegt. Experimente am Prototypen oder schließlich auch an ersten Serienbauteilen dienen der Überprüfung der prognostizierten Eigenschaften und dem Nachweis der Prozessfähigkeit für die gewählten Produktionsprozesse.

Mein Aachener Kollege Michaeli wählt hier als Beispiel gerne das *Antiblockiersystem* eines modernen Kraftfahrzeugs. Millionenfach produziert, möglicherweise zehn Jahre bei Wind und Wetter im Einsatz, ohne je in einen Bremsvorgang eingreifen zu brauchen, muss es doch in der entscheidenden Millisekunde richtig reagieren, um eine plötzlich eintretende, kritische Fahrtsituation zu meistern. Als Verbraucher nehmen wir dies in Anspruch, ja wir würden den Hersteller verklagen, wenn das System versagen würde. Aber machen wir uns klar was dies für die Dauerhaftigkeit der verwendeten Bauteile und Steuerungselemente, deren reproduzierbar definierte Herstellbarkeit und Zuverlässigkeit im Betrieb bedeutet?

Modell und Experiment sind die wesentlichen Methoden zur Überprüfung und Realisierung solcher Ziele. Nicht der Glaube hilft, sondern das rationale Vorgehen des Wissenschaftlers, der die Zulässigkeit einer vereinfachten Modellannahme abschätzen kann oder mit kritischem Blick die Anordnung und Ergebnisse eines Experiments prüft. Allerdings muss er auch im Team ein System mit dezentraler Intelligenz beherrschen, um letztendlich zu einem erfolgreichen Produkt zu gelangen.

Vor diesem Hintergrund lässt sich auch gut unsere Rolle als Kunststofftechniker erläutern: Wir sind Spezialisten für die Werkstoffgruppe *Kunststoff*, das Konstruieren mit diesen Werkstoffen und deren Verarbeitung zu Serienprodukten. Der



(1) Prinzip der Informationsspeicherung auf einer Compact Disc.

Grafik: MAKROLON/M. Löcher

Materialwissenschaftler, im Bereich der Polymere oft der Naturwissenschaftler aus der makromolekularen Chemie oder der Polymerphysik, entwickelt neue Materialien. Dazu greift er auch unsere Wünsche nach neuer oder verbesserter Funktionalität auf. Im Gegenzug ist es unsere Aufgabe, diese Materialien als Werkstoffe für neue Produkte zu verwenden. Diesen Prozess möchte ich nachfolgend an Beispielen der Entwicklung von Bauteilen aus Kunststoffen aufzeigen.

#### Die Entwicklung von Bauteilen aus Kunststoffen

Im Mittelpunkt der Betrachtung steht das Produkt mit seiner Funktion. Komplexe Produkte, wie etwa Flugzeuge, Fahrzeuge oder Computer sind aus zahlreichen Bauteilen zusammengesetzt, die jeweils vielfältige Teilfunktionen erfüllen. In deren Zusammenwirken schließlich funktioniert das System in der vor-

gesehenen Weise. Die einzelnen Bauteile erfüllen unterschiedlichste Funktionen: Speichern (zum Beispiel Energie oder Information), Leiten oder Isolieren (etwa Kräfte, Bewegungen, Wärme, Elektrizität, Flüssigkeiten oder Schall), Verbinden usw. Jeder Funktion entsprechen bestimmte Werkstoffeigenschaften, so eignen sich Kunststoffe gut zum Isolieren von Wärme und Elektrizität, aber schlecht zum Leiten von Kräften. Die Auswahl geeigneter oder die Entwicklung neuer Werkstoffe folgt damit den geforderten Bauteileigenschaften in der Anwendung.

Dies allein jedoch reicht nicht zur Klärung, warum welcher Werkstoff in welchem Bauteil sinnvoll eingesetzt werden kann. Nehmen wir ein spektakuläres Bauteil aus Kunststoff, die Compact Disc, die heute millionenfach zur Speicherung von Musik- und Dateninformation hergestellt wird (Abb. 1). Das Grundprinzip ist das der Speicherung von Information durch die

lokalen optischen Eigenschaften des Datenträgers. Bei der konventionellen CD wird dies durch die gezielte Prägung der Oberfläche mit sogenannten Pits, kleinen, wenige Nanometer großen Erhebungen erreicht. Um diese Information zu lesen, muss ein Laser durch das Speichermedium hindurchstrahlen, der Strahl wird an der ruckseitigen Oberfläche fokussiert und reflektiert.

Die digitale Information, das *Ja* oder *Nein*, ergibt sich aus der Laufzeit des Lasers – je nach Vorhandensein der Erhöhung, des Pits, länger oder kürzer. Kleinere Verunreinigungen an der Oberfläche sind nicht störend, da der nanometergenaue Lesevorgang des fokussierten Lasers an der inneren Oberfläche der Scheibe stattfindet.

Von der optischen Funktion des Systems aus betrachtet würde jeder transparente Werkstoff, also etwa auch Glas, geeignet sein. Um die letztendlich getroffene Werkstoffauswahl für diese Anwendung zu

verstehen, muss man jedoch auch den Fertigungsprozess betrachten.

Ein sehr produktives Verfahren zur Herstellung von Bauteilen in der Kunststofftechnik ist das Spritzgießen. Eine Spritzgießmaschine besteht aus einer *Plastifiziereinheit*, die *Kunststoffschmelze* erzeugt und unter hohem Druck in eine Form, das *Werkzeug*, einspritzt, und einer hydraulischen Presse, der sogenannten *Schließeinheit*, in die das Werkzeug eingebaut wird (Abb. 2).

Kunststoffe mit ihren, im Vergleich zu vielen anderen Werkstoffen niedrigen Schmelztemperaturen können in diesen Maschinen mit höchster Präzision in Formteile verwandelt werden. Eine Nachbearbeitung zum Erreichen einer bestimmten Oberflächenkontur kann in den meisten Fällen entfallen. Das beim Spritzgießen erforderliche hochpräzise Stahlwerkzeug arbeitet praktisch verschleißfrei, so kann aus einer mit hohem Aufwand einmalig hergestellten Form millionenfach ein Teil gefertigt werden. Damit wird klar, warum nicht Glas, sondern ein transparenter Kunststoff für die Fertigung von Compact Discs ausgewählt wurde.

Aber es gibt sehr viele Kunststoffe, allein bei den in der Schmelze verarbeitbaren Thermoplasten werden über 10.000 verschiedene Handelsprodukte angeboten. Warum also kann dieses Produkt *nur* aus einem sogenannten *niedrigmolekularen Polycarbonat* hergestellt werden?

Wir erinnern uns: Beim Spritzgießen der Thermoplaste wird unter hohem Druck Schmelze in eine Form eingespritzt. Damit die Information auf die CD gelangt, enthält die Oberfläche der Form die entsprechende Gravur. Nur wenn die Schmelze genügend dünnflüssig ist – wir sprechen hier von einer *niedrigviskosen Formmasse* – kann überhaupt die Oberfläche genügend genau abgeformt werden.

Schließlich sind weitere Kunststoffe bei der Herstellung erforderlich: In der kalten Form erstarrt der

Werkstoff. Dabei zieht sich er sich zusammen. Die Folge wäre die Zerstörung der Oberflächengravur. Also muss bei der Fertigung der Einspritzdruck soweit erhöht werden, dass sich die Form gegen den Druck der hydraulischen Schließeinheit geringfügig öffnet. Bei der Erstarrung drücken dann die Werkzeughälften gegen den Werkstoff, die Kontraktion findet nur in Dickenrichtung, nicht aber in Umfangsrichtung der Compact Disc statt. Diese Fertigungsweise, das *Spritzprägen* erfordert wiederum definierte Erstarrungseigenschaften des Werkstoffes.

Schließlich bewirkt das Fließen der Schmelze im Werkzeug eine Ausrichtung der fadenförmigen Makromoleküle, der Werkstoff wird *orientiert*. Dieses Phänomen tritt grundsätzlich bei der Verarbeitung von Kunststoffen auf und verändert die Eigenschaften des Werkstoffes nachhaltig. So beeinflusst die Orientierung nicht nur die Festigkeit des Werkstoffes sondern auch die optische Doppelbrechung. Dies wiederum bewirkt unterschiedliche Laufzeiten des abtastenden Laserlichtes, die Information würde bei unterschiedlichen Orientierungszuständen auf der Compact Disc nicht mehr fehlerfrei lesbar sein.

Also muss durch geeignete Prozessführung beim Spritzgießen, aber auch durch die entsprechende chemische Zusammensetzung des Makromoleküls erreicht werden, dass die durch Fließprozesse bei der Fertigung eingebrachte Ausrichtung der Makromoleküle wieder in „Unordnung“ gebracht wird – im Terminus Technicus ausgedrückt: die *Orientierung* muss *relaxieren*. Der Zustand gleichmäßiger Unordnung stellt sich durch die Wärmebewegung der Molekülsegmente und das natürliche Streben nach dem Zustand größter Unordnung dann ein, wenn durch hohe Temperaturen in der Schmelze diese Wärmebewegung erzeugt wird und der Schmelzzustand ausreichend lange erhalten bleibt. Auch sind kurzkettige Moleküle schneller

wieder ungeordnet als langkettige. Somit sind hitzestabile, kurzkettige Polymere erforderlich. Der mit der Kurzkettigkeit einhergehende Verlust an mechanischer Zähigkeit kann bei dieser Anwendung toleriert werden. Das Ergebnis all dieser Überlegungen: das zur Herstellung von Compact Discs erforderliche Polycarbonat wird für diese Anwendung maßgeschneidert hergestellt. Fassen wir zusammen:

- Nicht nur die Werkstoffeigenschaften beim Gebrauch des Produktes, sondern auch die Werkstoffeigenschaften im Fertigungsprozess sind von großer Wichtigkeit.
- Erst durch die Betrachtung der Wechselwirkungen von Werkstoff, Produkteigenschaft und Fertigungsverfahren entsteht das neue Produkt.
- Häufig wird für das neue Produkt ein neuer Werkstoff maßgeschneidert.

### Neue Polymerwerkstoffe

Ziel der Werkstoffforschung ist es, polymere Werkstoffe mit neuen Eigenschaften zu entwickeln. Funktionale Polymere mit besonderen optischen, magnetischen oder elektrischen Eigenschaften sind Grundlage neuer Technologien – wie etwa der wiederbeschreibbaren Datenträger oder der Polymermembranbrennstoffzelle. Faserverbundkunststoffe erreichen bei geringem Gewicht extreme Festigkeiten oder Steifigkeiten.

Wirtschaftlich und für die Zunahme der Kunststoffarten bedeutsamer ist jedoch das Feld der optimierten Synthese bereits bekannter *Monomere* zu verbesserten *Polymere*. Wie keine andere Werkstoffgruppe sind nämlich die Polymerwerkstoffe geeignet, durch gezielte Eingriffe in den molekularen Aufbau in ihren Eigenschaften modifiziert zu werden. Um diesen Zusammenhang verständlich machen zu können, muss ich ein wenig auf den Aufbau eines *Makromoleküls* eingehen.

*Polymermoleküle* sind lange Kettenmoleküle, die aus Einzelsegmenten, den *Monomerbausteinen* gebil-



(2) Spritzgießmaschine.

Foto: ARBURG GmbH + Co

det werden. Die Eigenschaften des Werkstoffes werden sowohl von den Bindungskräften entlang der Kette, wie auch von den Wechselwirkungen zwischen den Ketten bestimmt. Lassen Sie uns bei den Makromolekülen verschiedene Bauformen unterscheiden:

Ist das Monomere *symmetrisch* – als Analogie möge man sich als Glieder einer Kette gleichgroße Kreisinge vorstellen –, so können sich dennoch die hieraus hergestellten Ketten in ihrer Kettenlänge und Kettenverzweigung unterscheiden. Der Polymerwerkstoff wird dann in seinen Eigenschaften durch die Kennzahlen *mittlere Kettenlänge*, *statistische Verteilung der verschiedenen Kettenlängen* sowie *Art und Anzahl der Verzweigungen* bestimmt.

Ist das Monomere *asymmetrisch* – als Analogie mögen hier Kettenglieder etwa in Form einer Acht mit einem großen und einem kleinen Ring dienen –, so ist die *Einbaulage* der einzelnen Glieder in eine Kette

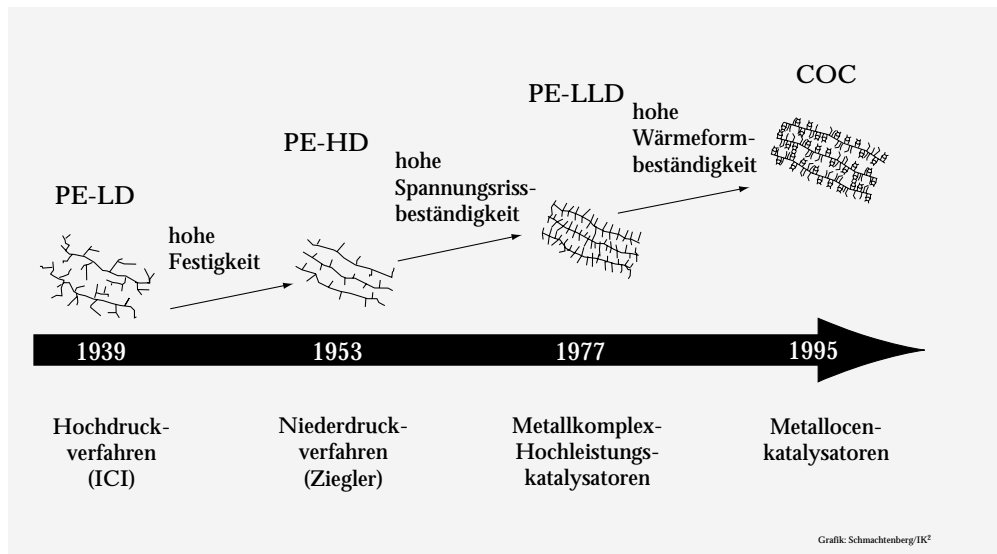
von Bedeutung. Denkbar sind unterschiedlichste Asymmetrien bei der Verbindung der Kettenglieder, etwa in der Kombination von vorne an vorne, vorne an hinten und dies regelmäßig oder zufällig. Sind die Kettenglieder darüber hinaus nicht entlang ihrer Verbindungsachse *rotationssymmetrisch*, so ist eine regelmäßige, eine wechselseitige oder eine statistische Anordnung der Seitengruppe möglich (*Taktizität*). Eine regelmäßige Anordnung erhöht etwa die Fähigkeit zur Kristallisation, hieraus abgeleitet entsteht eine höhere Steifigkeit des Werkstoffes.

Gebräuchlich sind etwa 30 unterschiedliche Monomerbausteine, hieraus leiten sich auch die Namen der Polymere ab. Werden nun zwei unterschiedliche Monomerbausteine in eine Kette zusammen eingebaut, so sprechen wir von *Copolymeren*. Je nach Bedarf sind die Monomerbausteine *statistisch*, *alternierend* oder in *längeren Blöcken* in der Polymerkette angeordnet. Teilweise werden

sie auch als Seitenketten des Typs B an die Grundkette des Typs A angehängt (*Pfropfcopolymer*).

Nun, wenn dies noch nicht reichen sollte, um die Vielfalt der Polymerwerkstoffe zu erklären, so möge man bitte bedenken, dass durch die Wahl von sogenannten *Zuschlagstoffen* (Treibmittel für Schaumstoffe, Flammenschutzmittel, Verstärkungsfasern, Stabilisatoren, Pigmente, Verarbeitungshilfsmittel, Weichmacher usw.) zusätzliche Gestaltungsspielräume bestehen, um zu Polymeren zu gelangen, die für die jeweilige Anwendung maßgeschneidert sind.

Zusammengenommen nenne ich dies den *Werkzeugkasten der makromolekularen Chemiker*. Meine Einschätzung ist, dass wir noch über viele Jahre mit immer wieder neuen Werkstoffen aus diesem Werkzeugkasten rechnen können. Dabei ist das oben genannte Beispiel der Compact Disc ein typischer Fall für die Entwicklung eines maßgeschneiderten Werkstoffes.



(3) Entwicklung des Polyethylens.

Ein Beispiel für das Entwicklungspotential selbst einfacher Massenkunststoffe liefert das Polyethylen (Abb. 3). Stets fußt der Polymerwerkstoff auf dem gleichen Monomerbaustein, dem Ethylen. Zunächst wurde Polyethylen (PE) in einer Struktur mit langen, verzweigten Seitenketten polymerisiert. Basierend auf der Entwicklung der Katalysatoren gelang 1953 dem Deutschen Karl Ziegler und dem Italiener Giulio Natta die Herstellung höherfester Polyethylene mit wenigen kurzen Seitenketten. Durch Einführung der Metallkomplekatalysatoren konnten ab etwa 1977 Polyethylentypen gezielter im Sinne der Kettenlänge und Unterschiedlichkeit der Kettenlänge (Molmassebereich, Molmasseverteilung) synthetisiert werden, wie etwa die im Vergleich zu herkömmlichem PE-LD (Low-density polyethylene) besonders spannungsrisssbeständigen linearen PE-LLD (Linear low-density polyethylene). Die neueste Entwicklung bei den Metallocenkatalysatoren führte zu den Cyclo-Olefin-Copoly-

meren (COC), einem amorphen, transparenten und hoch wärmeformbeständigen Thermoplasten, der ebenfalls aus dem Monomer Ethylen hergestellt wird.

Ein besonders entwicklungsfähiges Produkt ist das Polypropylen, das durch die verbesserten Methoden der Polymerisation in seiner Leistungsfähigkeit deutlich gesteigert werden konnte und daher heute bereits oft als Substitutionswerkstoff für teurere technische Polymere wie etwa das Polyamid eingesetzt wird. Zahlreiche neue Anwendungen etwa in der Innenauskleidung von Kraftfahrzeugen, als Gehäusewerkstoff für Elektronikgeräte oder im Heißwasserbereich bezeugen das hohe Wachstumspotential dieses Werkstoffes.

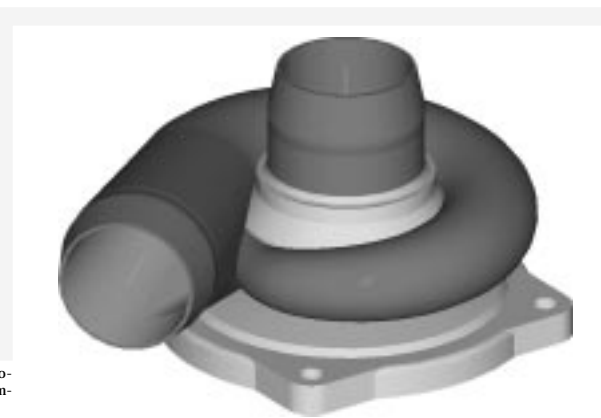
**Werkstoffgerechtes Konstruieren erschließt neue Anwendungen**

Aus dem Vorhergesagten wird deutlich, dass dem Ingenieur die Rolle zukommt, neue Materialien als Werkstoffe in die Serienproduktion einzuführen. Dabei muss er durch

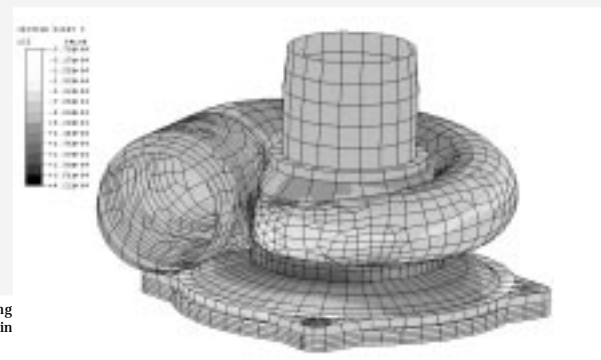
entsprechende Verarbeitungstechniken oder Konstruktionsweisen den Besonderheiten des jeweiligen Werkstoffes gerecht werden.

Herausragende Beachtung beim Konstruieren mit Kunststoffen kommt der Merkmalsausprägung *ausgezeichnete Formbarkeit* von Kunststoffbauteilen zu. Einmal in die Form des Spritzgießwerkzeuges eingebracht, kann jedes Formdetail ohne zusätzlichen Aufwand vieltausendfach neu gegossen und so kostengünstig reproduziert werden. Daher versuchen wir beim Konstruieren möglichst *viele Funktionen in ein Bauteil* zu integrieren. Typische Beispiele sind Gehäuse von Elektrogeräten: Schnapphaken und Fügeflächen zur Verbindung der Gehäusenhälften, Lagerelemente für Schalter und Einbauteile, Kabeldurchführungen, Farbe, Narbung der Oberfläche und Beschriftung – dies alles sind typische Konstruktionsmerkmale eines solchen Bauteils.

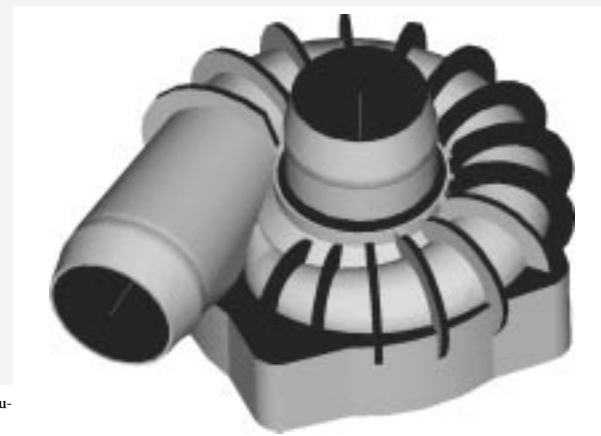
Hohe Produktivität erreicht man durch kurze Zykluszeiten beim Spritzgießen. Maßgeblichen Einfluss



(4) Ausgangsgeometrie eines Pumpengehäuses.



(5) Berechnung der Spannungen in der Geometrie.



(6) Optimierte Bauteilgestalt.

auf diese Zykluszeit nimmt der Erstarrungsvorgang der Schmelze. Je dünnwandiger das Produkt ist, um so kürzer werden die Zykluszeiten. Also muss der Entwickler möglichst dünnwandige Formteilegestalt anstreben, was jedoch in der Regel zu niedriger Festigkeit (Widerstand gegen Rissbildung) und Steifigkeit (Widerstand gegen Verformung) des Bauteils führt. Durch stark gewölbte Oberflächen und verrippte Strukturen gelingt jedoch häufig der Kompromiss zwischen geringer Wanddicke und hoher Bauteilfestigkeit. Aber: Wie und mit welchen Werkzeugen sind solche Optimierungsaufgaben zu lösen?

Wir nutzen die aus der Mechanik abgeleitete Methode der *Finiten Elemente*: Das Bauteil wird zunächst in seiner Geometrie als dreidimensionales Modell entworfen. Hierzu nutzen wir die rechnergestützte Zeichnungserstellung, sogenannte 3-D-Modellierer. Beispielhaft sei dies an einem Pumpengehäuse gezeigt (Abb. 4). Maßgeblich für die Gestaltung dieses Gehäuses in der Entwurfsphase waren zunächst die Innenkonturen im Bereich des strömenden Mediums, die den hydraulischen Wirkungsgrad der Pumpe nachhaltig beeinflussen sowie die Anschlusssituation im Bereich des Motorantriebs und der Leitungen. Weder Fertigungs- noch Werkstoffaspekte fanden bis zu diesem Zeitpunkt Berücksichtigung.

Zur Betrachtung des Verhaltens des Bauteils unter dem wirkenden Innendruck und den Dichtungskräften müssen wir ein mechanisches Modell des Bauteils entwickeln. Dazu wird das Bauteil in kleine Elemente, die sogenannten *finiten Elemente* zerlegt. In jedem dieser Elemente kann lokal die Wechselwirkung zwischen den auf das Element wirkenden Kräften und den hieraus resultierenden Verformungen durch vergleichsweise einfache mechanische Gleichungen hergestellt werden. In der Übertragung der Wirkung in den einzelnen Elementen auf die gesamte Struktur gelingt die Be-

schreibung des Bauteilverhaltens unter Betriebsbedingungen.

Das Ergebnis einer solchen Simulationsrechnung zeigt beispielhaft Abbildung (5). Die Beanspruchung des Werkstoffes wird durch die örtlich auftretenden Spannungen erkennbar, denen in der Ergebnisdarstellung unterschiedliche Farbschattierungen zugeordnet werden. Es fällt auf, dass die einzelnen Bereiche sehr stark unterschiedlichen Beanspruchungen unterliegen. Überspitzt gesagt kann man folgern, dass der Werkstoff in manchen Bereichen kaum, in anderen wiederum zu sehr beansprucht wird.

Auf diese Weise können wir Bauteilversuche am Bildschirm durchführen, an Bauteilen, die nur in der virtuellen Welt des Rechners existieren. Hier lassen sich konstruktive Mängel erkennen und noch einfach und ohne großen Aufwand beheben. Wird der Mangel erst später bemerkt, so sind kostspielige Änderungen an den Produktionswerkzeugen oder noch gravierendere Rückrufaktionen von bereits ausgelieferten Produkten erforderlich.

Durch Änderung der Gestaltung in mehreren Iterationsschleifen werden die Schwachstellen eliminiert. Ich möchte dies hier nicht ausführlicher erläutern, denn dazu benötige ich in der Regel eine gesamte Vorlesungsreihe. Hier muss es ausreichen, das Ergebnis der Vorgehensweise darzustellen (Abb. 6): Durch Verrippungen und Änderungen im Flanschbereich wird das Bauteil versteift, die Änderung der Dichtungssituation verringert die auf das Bauteil einwirkenden Kräfte. Zugleich entfallen Hinterschnitte, um so ein einfacheres Werkzeugkonzept beim Spritzgießen umsetzen zu können.

Die bisher angestellten Überlegungen zeigen: Entwickler müssen bei der Gestaltung von Bauteilen aus Kunststoffen werkstoff- und verarbeitungsgerecht konstruieren. Durch die systematische Anwendung von Simulationssoftware lassen sich heute in frühen Entwicklungsstadien

Bauteilverhalten und übrigens auch die Herstellbarkeit im Spritzgussverfahren abschätzen. Dabei ist es auch eine wichtige Aufgabe der Werkstofftechnik, durch Modellierung der Werkstoffeigenschaften in Materialgesetze und durch experimentelle Ermittlung der beschreibenden Kennzahlen zu diesen Materialgesetzen das Entwickeln neuer Produkte aus neuen Materialien mit den hier beschriebenen Methoden überhaupt erst zu ermöglichen.

### Der Weg zu neuen Lösungen

Vor diesem Hintergrund sind nun gut die treibenden Kräfte beim Substitutionswettbewerb der Werkstoffe zu erkennen. Nehmen wir als Beispiel den Automobilbau.

Die Suche nach kostengünstigen Fertigungsprozessen löst den Substitutionsvorgang aus. Kunststoffe mit ihrer guten Verarbeitbarkeit erlauben niedrige Fertigungskosten. Doch die im Vergleich zu Metallen bestehenden mechanischen Eigenschaften haben jedoch zunächst den Einsatz dieser Werkstoffgruppe als fragwürdig erscheinen lassen. So war der starke Einfluss der Temperatur auf Festigkeit und Steifigkeit von Kunststoffbauteilen stets ein Grund, Kunststoffbauteile im Bereich des Motors für ungeeignet zu betrachten. Schließlich ist es in den letzten Jahren durch die Entwicklung hitzestabilisierter Polymere und einer geeigneten Bauteilgestaltung dennoch gelungen, Ansaugrohre, Thermostatgehäuse, Kühlerwasserkästen, Ölwannen und Zylinderkopfschrauben in Kunststoff zu realisieren. Damit ließen sich gleichzeitig Fertigungskosten reduzieren und Gebrauchsnutzen erhöhen, etwa in Form von geringerem Bauteilgewicht. Und dies half vielleicht auch, den Benzinverbrauch zu reduzieren.

Wie eingangs gesagt: Die Entwicklung unserer Profession hat uns sowohl zu „Materialpragmatikern“ wie auch zu „Teamstrategen“ werden lassen. Als solche schauen wir

nicht nur nach vorne, sondern auch gerne an der „Entwicklungskette“ entlang zurück, zu den Materialwissenschaftlern. Inzwischen pflegen wir den Austausch und sitzen häufiger zusammen, denn nur so haben wir die Entwicklung neuer Werkstoffe *vollständig* im Blick und können uns in unseren Kompetenzen stützen. Man weiß halt, wie der Kaffee schmeckt.

### Summary

This paper describes the connection of material science to engineering of new products. Starting with an analysis of different perspectives a material scientist on the one hand (formed by his education as physician or chemist), and the product engineer on the other (guided by his aim for application) would come to have.

The engineer learns the handling of materials from processes of product engineering. It will be shown on the example of mechanic materials, that the development of new materials is not only driven by the new requirements on properties of application. Specially the demanded properties for the processing deliver a great stimulus here. If one wishes to make prognoses on usability, the modelling of material properties is a key element of an engineer's handle of material.

### Der Autor:

Ernst Schmachtenberg studierte Maschinenbau in Aachen. Von 1981 bis 1987 arbeitete er am Aachener Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), zunächst als wissenschaftlicher Mitarbeiter in dem Arbeitsgebiet Werkstoffkunde der Kunststoffe, später als Leiter der Abteilung Formteileauslegung/ Werkstoffkunde/Faserverbundwerkstoffe. 1985 promovierte er dort mit dem Thema „Die mechanischen Eigenschaften nichtlinear viskoelastischer Werkstoffe“. 1988 ging er als Abteilungsleiter für Forschung und Entwicklung zum Süddeutschen Kunststoff-Zentrum nach Würzburg, wo er 1989 auch Leiter der dortigen amtlich anerkannten Prüfanstalt und Mitglied

der Institutsleitung wurde; 1990 wechselte er zur Bayer AG, Leverkusen, in den Geschäftsbereich Kunststoffe. Dort übernahm er zunächst die Leitung der Gruppe verfahrenstechnische Entwicklung Spritzguss. 1991 wurde er Abteilungsleiter „Konstruktion, Formteilprüfung, CAE“. 1993 wurde er auf die Professur für Kunststofftechnik in Essen berufen. Zeitgleich mit seiner Berufung wurde er zum Geschäftsführer der IKM GmbH, einem Tochterunternehmen des RWTÜV, bestellt. Diese Einrichtung dient seitdem dem intensiven Technologietransfer zwischen der Professur für Kunststofftechnik und der Industrie.

Von Oktober 1996 bis zum März 2000 hatte Schmachtenberg zusätzlich das Amt des Prorektors für Personal und Finanzen inne. Seine Arbeitsschwerpunkte in Forschung und Lehre sind die Produktentwicklung in der Kunststofftechnik, die Werkstoffkunde der Kunststoffe, das Konstruieren mit Kunststoffen und die Bereiche Kunststoffverarbeitung und Faserverbundwerkstoffe.