

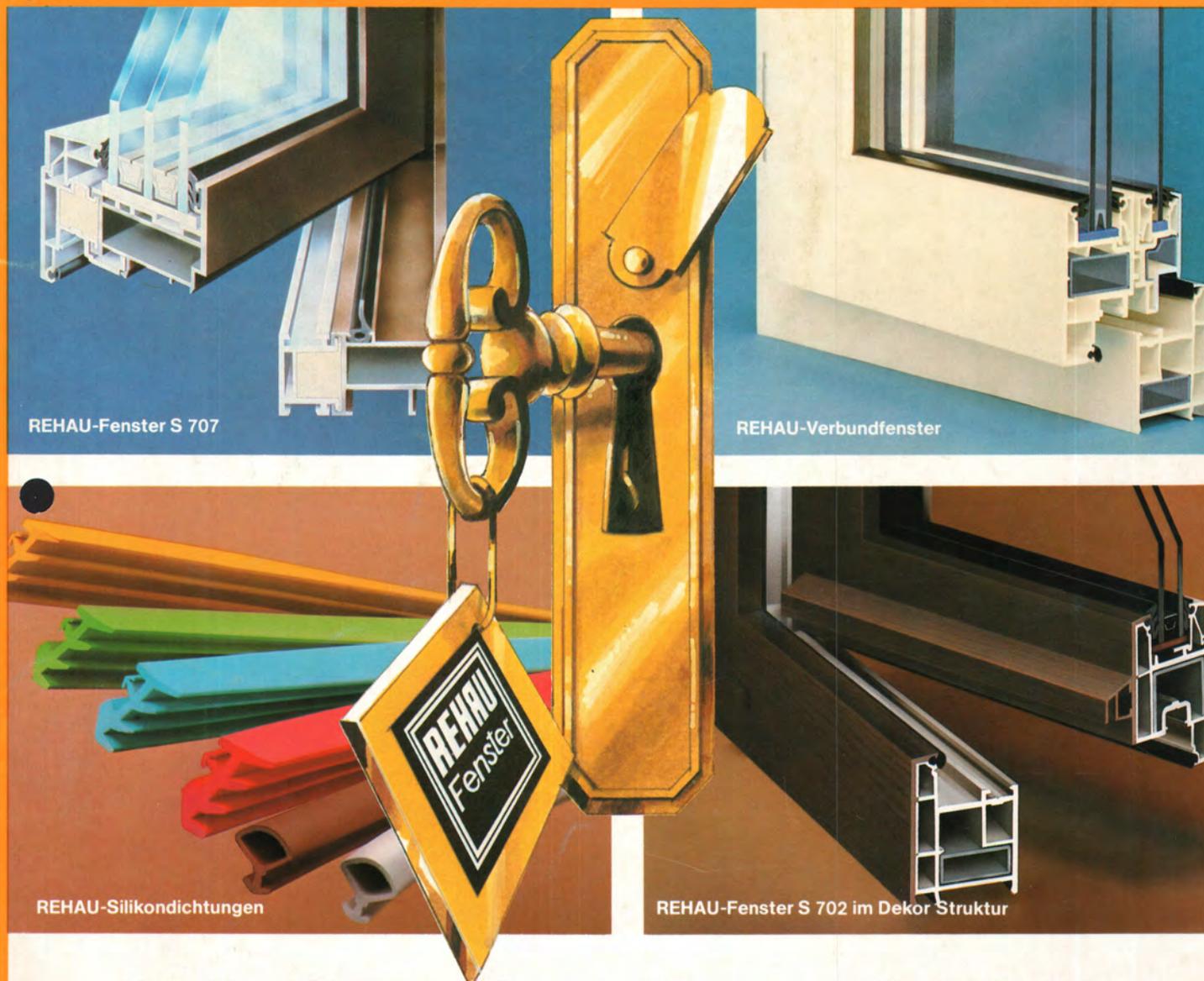
# Kunst- stoffe im Bau

# 1·82

Eine Fachzeitschrift des  
Carl Hanser Verlags, München  
17. Jahrgang 1982 Heft 1

Organ des Instituts für das  
Bauen mit Kunststoffen, IBK,  
Darmstadt, und des I.C.P.

Herausgegeben von  
Baurat A. Schwabe u.  
Dr. Hj. Saechtling



REHAU-Fenster S 707

REHAU-Verbundfenster

REHAU-Silikondichtungen

REHAU-Fenster S 702 im Dekor Struktur

## Der Schlüssel zum Erfolg

zur Ummantelung  
alter Blend-  
rahmen

VEKA-System SP  
flächenversetzt  
mit Anschlag-  
dichtungen

VEKA-System MF  
flächenversetzte  
Konstruktion mit  
besonders geringer  
Bauhöhe

VEKA-System AL  
Kombination aus  
Kunststoff und  
Aluminium

System HT  
für Konstruk-  
tion mit Alu-Boden-  
platte

VEKA-System MD  
flächenbündige  
Mitteldichtungs-  
konstruktion

VEKA-System SF  
Basis-Profilkom-  
bination, flächenbün-  
dig mit Anschlagdich-  
tungen

**NEU**

VEKA-System VB  
Verbundfenster  
für extremen Wärme-  
und Schallschutz

# Systematisch.

unterschiedlichen Anforderungen an das  
Element Fenster verlangen maßgeschneiderte  
Lösungen. VEKAPLAST widmet sich seit Jahren mit  
dem ungewöhnlichem Erfolg der systematischen  
Entwicklung objektgerechter Konstruktionen.  
Deshalb steht auch für Ihre Planung in jeder  
Sache das „passende“ VEKA-System bereit.  
Unser Fachverständnis können Sie ausgefallene Farb-

und Formvorstellungen ebenso realisieren wie  
extremen Wärme- und Schallschutz. Senden Sie  
uns Ihre Ausschreibungen und nutzen Sie die  
Möglichkeit, zusammen mit dem VEKA-Beratungs-  
team in Ihrem Büro optimale Lösungen zu  
erarbeiten. Wir nennen Ihnen nicht nur das  
richtige System, sondern auch den erfahrenen  
VEKA-Fachbetrieb in Ihrer Nähe.

**Wer durchblickt, baut  
VEKA-Fenster-  
und Rolladensystemen!**

Kunststoff-Fenster und -Türen · Rolläden ·  
Schiebetüren · Haustüren · Sonder-  
funktionen · Spezialprogramm für die  
Modernisierung



Ich bitte um  fachmännische Beratung nach tel.  
Anmeldung;  Dokumentation und Prospekte vorab;  
 ein Angebot zu beigefügter Ausschreibung;  
 die Anschrift des Fachbetriebs in meiner Nähe;  
 Vorführung Ihrer Video-Kassette.

Name/Anschrift/Tel.

Bitte senden Sie den Coupon an  
VEKAPLAST, Info-Zentrale, D-4401 Sendenhorst



**VEKAPLAST**

Heinrich Laumann  
Dieselstraße 8 · D-4401 Sendenhorst  
☎ 0 25 26/29-0 · Telex 89 548 veka

|



# Klassifizierung von Komposit-Werkstoffen und die Kompositen mit Plasten\*

Richard A. Bareš

**Vorbemerkung.** Professor Bareš, der Empfänger des »Award of honour 1981« des I. C. P., ist damit für seine Verdienste um die Entwicklung höchst resistenten und belastbaren Polymerbetons, insbesondere auf Furanharz-Basis, in langjähriger Forschungsarbeit geehrt worden (s. KIB 3/81, S. VI). In seiner folgenden Grundlagen-Darstellung der möglichen Typen und Strukturen solcher mehrphasigen Verbundwerkstoffe für unsere Zeitschrift gebraucht er das – an sich ebensowenig scharf wie der Begriff Verbundwerkstoffe abgegrenzte – Wort Composites in der verdeutschten Form »die Kompositen« zur Kennzeichnung bestimmter Typen.

## Einleitung

Die belebte pflanzliche und tierische Natur gibt uns mit der unendlichen Vielfalt der Verbunde und Strukturen von »Kompositen«, mit der sie jeweils einer bestimmten biologisch gegebenen Beanspruchung genüge leistet, ein Vorbild der Werkstoff-Ökonomie durch zweckgerichtete Stoffstrukturierung anstelle eines Universalwerkstoffes mit jederart vollkommenen Eigenschaftswerten, von denen jedoch die Mehrheit im Gebrauch ungenutzt bleibt. Nicht zuletzt die genauere Betrachtung solcher natürlicher Strukturen hat den wirtschaftenden Menschen in den letzten Jahrzehnten immer mehr auf das Studium der Anwendbarkeit material- und energiesparender Kompositen-Systeme anstelle von homogenen Werkstoffen als einen notwendigen Weg für alle Zweige der Technik vom ultraleichten Hochleistungsverbundwerkstoff für die Raumfahrt bis zum Bereich optimal tragfähiger und standfester Baustoffe für den Hoch- und Tiefbau verwiesen.

Kunststoffe (Plaste) spielen mit der Vielfalt ihrer Eigenschaften und Formungsmöglichkeiten bei diesen Entwicklungen eine – man kann sagen – dominierende Rolle. Andererseits erfüllen zumindest die heute wirtschaftlich verfügbaren C-Plaste allein kaum je die für bestimmte konstruktive Anwendungen im Bauwesen oder anderen Zweigen der Technik jeweils zu stellenden speziellen Anforderungen. Die Werkstoff-Forschung und -Entwicklung hat sich daher in großer Breite der Analyse von Kompositen-Systemen aus Plasten und anderen Bestandteilen zugewandt. Teilergebnisse an Einzelsystemen, die mit den Methoden der Chemie, Physik, Mechanik, auch der Mathematik und Statistik gewonnen sind, gibt es bereits in Fülle. Mit ihrer einseitigen Fallbezogenheit bieten sie aber keine »Patent-Rezepte«. Um erfolglosen Applizierungen vorzubeugen, ist derzeit vor allem eine Sichtung der Ergebnisse mit dem Blickpunkt auf die Grund-Systematisierung des komplexen Systemfeldes »Kompositen« für das Verständnis unter den Wissenschaftsdisziplinen erforderlich. Auch der Bauingenieur muß sich der Komplexität des Kompositen-Werkstofffeldes mit der Wechselwirkung der Phasen und Komponenten des Werkstoffes untereinander und mit der Umgebung bewußt werden, er muß im Werkstoff das System statt des Stoffes mit einigen Eigenschaften sehen lernen, so wie er auch in seinen Bauten im Gegensatz zum rein auf die Nutzung eingestellten Laien das Konstruktions-System sieht.

\* Nach dem Beitrag des Autors »Classification of composite materials and plastics composites« auf dem Internationalen Symposium ICP/RILEM/IBK »Plastics in Material and Structural Engineering«, Prag 1981. Anschrift: Institut für theoretische und angewandte Mechanik der Tschechoslowakischen Akademie der Wissenschaften, Vyschradská 49, 12 8 49 Praha, Czechoslovakia.

## Parameter der Kompositen-Makrostruktur

Die *Innenoberfläche* des Systems ist bezüglich möglicher Modifizierungen der einzelnen Phasen oder mit Rücksicht auf deren Einfluß bei Wirkungen des Außenmediums enorm wichtig. Die Komplexität der Verhältnisse, insbesondere bei Plast-Kompositen mit sehr verschiedenen Eigenschaften der einzelnen Phasen und ihr Einfluß auf Kriechen, Relaxation, Lebensdauer wird oft unterschätzt.

Als *Makrostruktursystem* muß in allen Kompositen mindestens *eine feste Phase* vorhanden sein, die allein, ohne Vorhandensein weiterer fester Phasen bestehen kann. Systeme mit zwei oder mehr solcher fester Phasen sind vorteilhaft.

*Fließbare* (flüssige oder gasförmige) *Phasen* können als verbundene Struktur einen beträchtlichen Teil des Volumens von Kompositen bilden, jedoch nicht mit der Möglichkeit selbständiger Existenz. Sie können mit der Umgebung in Interaktion stehen oder von dieser abgeschlossen sein.

Kompositen können *quasiisotrop*, aber auch ausgesprochen *anisotrop* sein. Einzelne Phasen können fibrillären, andere granulären Charakter haben.

In allen Kompositen kommt es zu vorwiegend physikalischen, physikalisch-chemischen oder auch chemischen *Interaktionen* zwischen den einzelnen Phasen, die eine gewisse Kompatibilität der Komponenten voraussetzen. Ihr dadurch bedingtes Werkstoffverhalten macht sie für den jeweiligen Anwendungszweck Homogenwerkstoffen ökonomisch und energetisch überlegen.

## Klassifikationskriterien der Kompositen-Grundtypen

Wie eingehende Untersuchungen gezeigt haben [1, 2, 3], ist eine Klassifikation der komplexen Kompositensysteme nicht nur möglich, sondern unerlässlich zur zielbewußten Ansteuerung und Prognose von Kompositen-Eigenschaften.

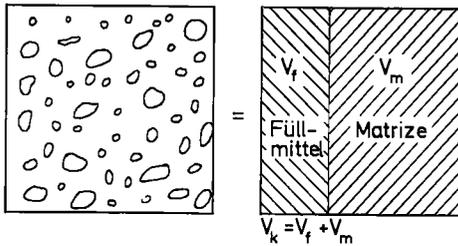
### Kompositen des I. Typs mit segregierter dispergierter Phase.

Es existiert eine ganze Reihe von verschiedenen Systemen, die völlig den gegebenen Raum ausfüllen, von reiner Matrize (also des homogenen oder quasihomogenen Systems) (Bild 1) über dispergierte (segregierte) Teilchen (Bild 2) bis zum System mit dispergierter Phase in der möglichst dichten (aggregierten) Anordnung (Bild 3), bei allen von denen die Matrize bestimmende Komponente der Eigenschaften ist. Die Dicke der Matrize von 2–200  $\mu$  zwischen dichtest gepackten aggregierten Teilchen je nach Matrizenart, Viskosität, Oberflächenspannung, Kontaktspannung mit Teilchen, Dichte kann durch keine zugängliche Art der Bearbeitung mehr vermindert

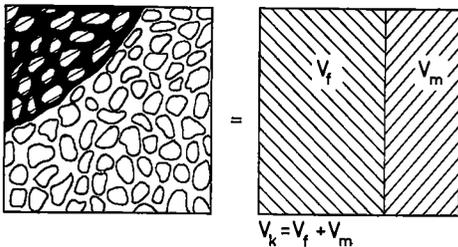


$V_k = V_m$

Bild 1. Kompositen des I. Typs – homogene (quasihomogene) Werkstoffe

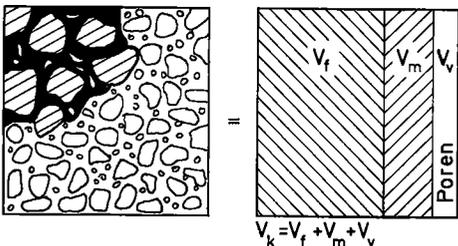


$V_k = V_f + V_m$



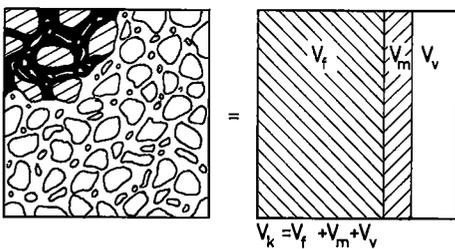
$V_k = V_f + V_m$

Bild 2–3. Kompositen des I. Typs – heterogene Werkstoffe



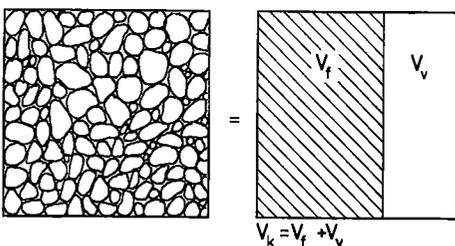
$V_k = V_f + V_m + V_v$

Bild 4. Kompositen des II. Typs



$V_k = V_f + V_m + V_v$

Bild 5. Kompositen des III. Typs



$V_k = V_f + V_v$

Bild 6. Schüttgut

werden. Diese gesamte Gruppe der Systeme kann man als Kompositen des I. Typus bezeichnen. Die experimentelle Bedeutung solcher Systeme, sehr breit und mannigfaltig in ihrem Volumen, brachte ungleichartige Ergebnisse, und es wurden daraus Folgerungen gezogen, die manchmal auch gegensätzlich waren. Meistenteils wurde der Einfluß der sich erhöhenden Menge der in die Matrize dispergierten Phase auf die Festigkeiten verfolgt. Unter bestimmten Bedingungen wird mit der Beimischung der dispergierten Phase die Festigkeit der Matrize nicht verringert, sondern wächst sogar [4, 5]. Das Problem ist erfolgreich nur durch die energetische Analyse zu lösen, der sich am meisten einige Autoren, die die Schlagfestigkeit (Schlagzähigkeit) dieser Kompositensysteme untersucht haben, genähert haben. Es geht darum, wie das entstandene System fähig ist, gelieferte Energie zu dissipieren, Mikrostörungen zu dämpfen oder zu lokalisieren, deren Ausbreitung zu verhindern udgl. Das ist nicht nur vom Volumenverhältnis der Phasen (der Matrizen und der dispergierten Teilchen) und deren mechanischen Eigenschaften abhängig, sondern auch von einer Reihe weiterer Faktoren:

- vom Verhältnis der Verformungseigenschaften von Phasen (Elastizitätsmodul, Querdehnungszahl, Grenzverformung, Formänderungsmodul, Kriechen, Relaxationsfähigkeit usw.)
- vom Verhältnis der Kohäsionsfestigkeit von Phasen und der Adhäsionsfestigkeit des Kontakts
- vom Verhältnis der Oberfläche und des Volumens der dispergierten Phase,
- vom primären Innen-Spannungszustand von der Bildung der Werkstoffe,
- vom Verhältnis der physikalischen Eigenschaften von Phasen (Wärmedehnzahl, Wärme- und elektrische Leitfähigkeit usw.)

Die Überschätzung von Festigkeitsmessungen (gewöhnlich der Zugfestigkeit) bei der Beurteilung der Kompositen ist zwar häufig, aber verfehlt. Schlußfolgerungen aus Kurzzeit-Festigkeitsmessungen können nach einigen Zyklen des Temperaturwechsels durchaus umgekehrt sein. Außerdem ist es manchmal nicht maßgebend, ob die kurzfristige Festigkeit, z.B. um 30% niedriger oder höher ist, sondern welche anderen Eigenschaften, z. B. Verformungs- oder physikalische Kennwerte, der resultierende Werkstoff besitzt.

**Kompositen des II. Typs mit aggregierter dispergierter Phase und geschlossenen Poren.**

Die feste Phase füllt in Kompositen des I. Typus den Raum, den sie einnehmen, restlos aus. Man kann von den End-(Grenz-)kompositen des I. Typus das Volumen der dispergierten Phase im gegebenen Körper nicht mehr ändern (die dispergierte Phase bleibt aggregiert); eine weitere Änderung des Volumenverhältnisses von beiden Phasen ist nur durch Matrizenreduktion möglich, an deren Stelle in das System die dritte, flüssige oder gasförmige (fluide, bzw. v = vakante) Phase eintritt. In der Matrize entstehen geschlossene Poren und das ganze Volumenverhältnis der festen Phase zum Körpervolumen verkleinert sich (Bild 4).

Die Kompositen dieser Art bilden eine weitere selbständige Gruppe, die wir als *Kompositen des II. Typus* bezeichnen können. Theoretisch endet dieses Gebiet mit dem System, bei dem sich die dritte »fluide« Phase verbindet und selbständige Quasistrukturen bildet, wodurch das System stetig durch Außenmedium verbunden ist. Diese Grenze kann praktisch nicht scharf sein, denn es kommt fortschreitend zur Verbindung der einzelnen geschlossenen Poren in verbundene Kanälchen. Die feste Phase nimmt in diesen Systemen – zum Unterschied vom I. Typus – nicht den ganzen Raum ein, der durch Werkstoffe abgegrenzt ist. Wenn die dritte Phase in

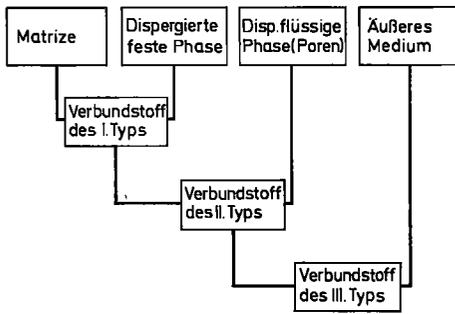
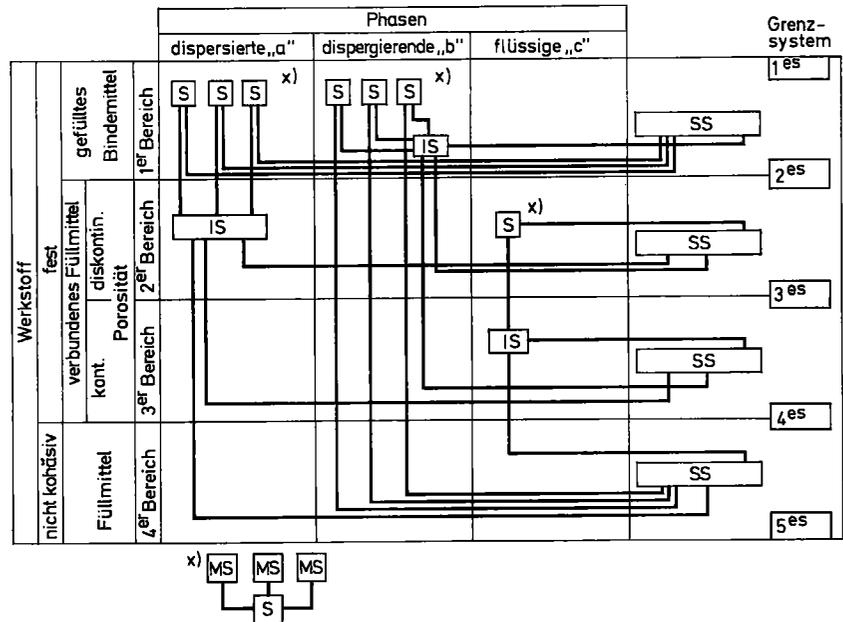


Bild 7. Klassifikation der Kompositen

Bild 8. Klassifizierung und Zusammensetzung der Superstruktursysteme. MS – Mikrostruktur (der Substanz), S – Struktur (der Phase), IS – Infrastruktur (der Phase), SS – Superstruktur (des Verbundstoffes)



vakanten Matrizen gasförmig ist, ist sie leicht kompressibel, wenn sie flüssig ist, ist sie völlig unkompressibel. Der innere primäre (von der Entstehung der Werkstoffe) Spannungszustand ebenso wie der sekundäre Spannungszustand (von äußeren Einflüssen) des Systems ist mit der Entstehung der vakanten Stellen ein anderer, die Dissipation der Energie ist eine andere usw. Die Werkstoffe haben im Falle der Porenanfüllung durch gasförmige Phase (das ist das üblichste) größere Möglichkeit der inneren Umformung ohne Bildung der Mikrostruktur und die entstandenen Mikrostörungen sind bald lokalisiert; die Dissipation der Energie ist ausdrucksvoller. Nach außen machen sich diese Einflüsse bemerkbar an z. B. Änderungen sowohl der Kurz-, als auch besondere der Dauerfestigkeiten, Erhöhung der Schlagfestigkeit und der Ermüdungsfestigkeit, Erhöhung der Lebensdauer und Senkung der Empfindlichkeit gegen Änderungen der Außenbedingungen, z. B. der Temperatur. Zu den Parametern, die bei Kompositen des I. Typus die resultierenden Eigenschaften bestimmen (Volumenverhältnis von festen Phasen, spezifische Flächen der dispergierten Phase und das Verhältnis der Phaseigenschaften) tritt ein weiterer Parameter: Verhältnis der flüssigen zur festen Phase.

### Kompositen des III. Typs mit aggregierter dispergierter Phase und kontinuierlicher Porosität

Sobald die Porosität des Systems kontinuierlich wird (ohne daß sich die Anordnung der dispergierten Phase im aggregierten Zustand geändert hätte) (Bild 5), kommt eine weitere Größe (oft maßgebend) zur Geltung: Innere Interaktionen der Kompositen mit Außenmedium. Dies ändert wieder in entscheidender Art und Weise das Verhalten des Systems, das für die Kompositen des III. Typus charakteristisch ist. Ein weiterer unerläßlicher Parameter, für die Beschreibung dieser Systeme ist also das Außenmedium. Die feste Phase nimmt einen immerfort kleineren Teil des gesamten Außenvolumens der Kompositen ein, die Matrize nimmt bis zu dem Augenblick ab, da die Urstruktur der Matrize zerfällt und die Werkstoffe schüttert, unkohäsiv werden (Bild 6).

### Typen-Übersicht und -Verhalten

Vereinfacht können wir die grundlegende Einteilung der Kompositen nach dem Schema Bild 7 veranschaulichen. Wenn wir eine solche Klassifizierung konsequenter und ausführlicher durchführen, gewinnen wir das Schema Bild 8, aus dem sich auch die Bedeutung einiger unerläßlicher Termini ergibt, die für eine vertiefte Beschreibung des in allen drei Grundtypen vielfältig möglichen stufenweisen Zusammentritts mehrkomponentiger Mikro- und Infrastrukturen zur Superstruktur des Kompositen unerläßlich sind.

Die Abhängigkeit der Eigenschaften von Kompositen zeigen abhängig vom Matrizenfüllmittel-Volumenverhältnis ( $V_m/V_f$  nach Bildern 1–6) markante Änderungen (Bilder 9 a und 9 b) im Bereich des II. Typs, der daher auch manchmal Übergangstyp genannt wird [1, 2].

Die Festigkeit (und andere Eigenschaften) werden durch die Unvollkommenheit der Mikrostrukturen der Substanzen (die die Phasenwerkstoffe bilden), der Struktur der Phasenwerkstoffe und des Verbundstoffes beeinflusst. Poren, Fehler und ungleiche Eigenschaften der Kompositen von mikroskopischem Ausmaß, verursachen Spannungskonzentrationen und ermöglichen die Entstehung von Deformationen, die bis zur Zerstörung führen. Besonders ungünstigen Einfluß üben, hinsichtlich der großen inneren Oberfläche von Kompositen, Oberflächen-Phasenfehler aus, denn durch die Wirkung der Schubspannung gehen daraus die Gleitflächen hervor, die

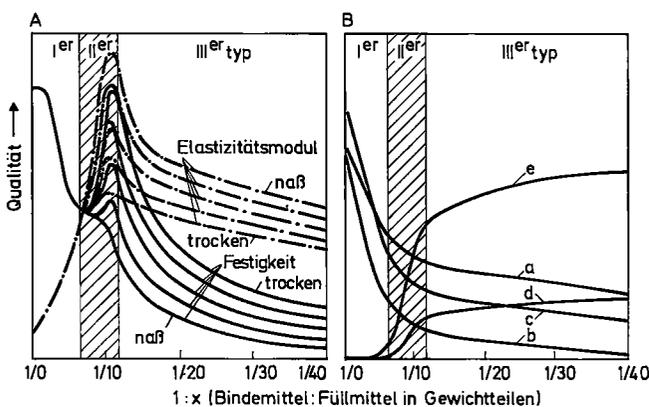


Bild 9. Änderung der Kompositeneigenschaften in Abhängigkeit auf dem Verhältnis der Matrize und der dispergierten Phase  
a Wärmehdehnzahl, b Schrumpfung, c Grenzverformung, d Feuchtedehnzahl, e Porosität

Hauptursache irreversibler Formänderungen sind, welche den kritischen Zustand der Trennung von Teilchen annähern. Gleiches gilt hinsichtlich der ungünstigen Wirkung der Absorption von Stoffen aus dem Milieu. Zusätzlich schadenswirksam sind Innenspannungen aus Produktionseingriffen (Temperaturwechsel, mechanische Beanspruchungen, Schrumpfungen).

### Kompositen mit Kunststoffen

Mit Kunststoffen kann man Kompositen von allen drei Typen bilden. In die Gruppe des I. Typs gehören alle gefüllten Thermoplaste oder Thermosets (Duroplaste), ebenso wie die meisten Plaste, die faserverstärkt sind. Die Grenze zwischen dem I. und dem II. Typ bewegt sich in Abhängigkeit von der

Parameterreihe in Grenze  $2 \approx \frac{V_m}{V_f} \approx 3$ . Außer dem eindeutigen Einfluß der spezifischen Oberfläche dispergierter Phase erwiesen die Experimentalergebnisse und allgemeine Überlegungen den Einfluß einer Reihe von weiteren Faktoren auf die Festigkeit und andere Eigenschaften der Komposite des I. Typus. So wächst die Schlagfestigkeit z. B. mit wachsender Differenz der Verformungseigenschaften (die z. B. durch Umformungsmodul, Grenzformänderung usw. charakterisiert sind) von beiden festen Phasen (z. B. von sprödem Harz und Kautschukfüllstoff ebenso wie der festen Borfasern in weicher Aluminiumlegierung) als Folge der wirkungsvollen Absorption der Energie an der Spitze von Mikrostörungen durch eine weiche Komponente in Werkstoffen. Die Dämpfung der Störungen und ihre Ausbreitung beeinflusst ebenfalls die treffend gewählte Verbundwirkung an der Grenze durch eine weitere hineingelegte Phase.

In Kompositen des II. Typs hat das Vorhandensein der fließbaren Phase einen bedeutenden Einfluß auf Verformungssystemcharakteristiken. Die Menge und die Größe der Poren bestimmt die Dissipation der Werkstoffenergie, welche die Dämpfung von Störungen und deren geeigneten Regelung verbessert. Wenn geschlossene Poren fortschreitend geöffnet werden und sich verbundene Porosität bildet, beginnen in solchen Kompositen des III. Typs die Außenbedingungen (Umgebung) die Eigenschaften der Werkstoffe zu beeinflussen, besonders infolge Anfüllung oder Entleerung der Poren mit Flüssigkeit. Es tritt hier dazu eine andere Variable, die das Volumen von Hohlräumen (Poren) in Werkstoffen ausdrückt.

Das Verhältnis  $\frac{V_m}{V_f}$  beim Übergang vom Typ II in Typ III, abhängig von einer Reihe weiterer Faktoren ist etwa

$3,5 \approx \frac{V_m}{V_f} \approx 6$ . In diese Typen der Kompositen gehören Stoffe wie Plastrmörtel, Plastbetone, Kombination der anorganischen Werkstoffe mit organischen in imprägnierten Systemen udgl. Das Einsortieren der einzelnen z. B. der granulierten Systeme mit Makromolekularmatrize in das vorne angeführte Schema ergibt sich auch aus der anschaulichen Darstellung im Dreieckdiagramm nach Volumenphasenvertretung – Bild 10. Aus diesem Diagramm ist z. B. zu ersehen, daß Systeme mit segregiertem Füllstoff (z. B. gefüllte Thermoplaste) ohne Poren eigentlich nur Grenzsysteme sind (im Diagramm lediglich auf einer Geraden a–b untergebracht), dadurch den Bruch von möglichen und praktisch auszunutzenden Granulatkompositen darstellen. Bei Systemen mit aggregiertem Füllstoff (im Teil des Diagramms mit Ordinate Füllstoff  $\geq b$ ) ist, sofern Undurchlässigkeit (also nicht verbundene Porosität) verlangt wird, nur ein kleiner Teil von praktischer Bedeutung. Er ist durch die Fläche b–c–e–f gegeben.

Die angeführte Aufgliederung ist grundlegend und setzt die Existenz nur einer phasen- und dimensionskontinuierlichen Struktur (Matrize) voraus. Das Problem wird weiter kompliziert, wenn sich außer einer Urmatrizenstruktur (die organischen oder anorganischen Ursprungs sein kann) im System gleichzeitig oder nacheinander folgend die zweite (eventuell auch eine weitere) verbundene Struktur bildet. Dann ändern sich bedeutsam alle Eigenschaften eines solchen Kompositen infolge der Zusammenarbeit von festen Strukturen bei der Deformation und der bedeutenden Erhöhung der inneren Energie. Man kann eine Monomer-Phase in breiten Zeitgrenzen in eine feste Polymer-Phase transformieren und Strukturen aus Polymerketten bilden. Zementbeton, in den beim Mischen ein härter Kunststoff als Mikrogranulat-Thermosetphase eingebracht wurde, bildet durch Zementhydratation das erste Struktur-Gerippe. Da sowohl im Zement selbst, als auch im Beton infolge des Wasserüberschusses, der für die Bearbeitung unerlässlich ist, nach der Aushärtung das Gewirre von Kapillarporen existiert, füllt das beigemischte Thermoset nach Anwärmen des Betons über seine Schmelztemperatur diese Poren ebenso wie übrige Störungen, Fugen und Risse im System mit relativ dünnen festen Häutchen an. Innerhalb von Beton wird die zweite Sekundärstruktur gebildet, die bei Beanspruchung mit der ersten zusammenarbeitet.

Ein anderes Beispiel ist die Beimengung von Polymerdispersionen oder Monomeren in frische Betonmischung. Gelingt es, die Inkompatibilität beider Komponenten zu überwinden, kann man die Bildung von zwei selbständigen Strukturen erreichen, sei es, daß sie – was das beste ist – gleichzeitig entstehend einander durchwachsen, sei es, daß in zeitlicher Folge die zweite Struktur die Kanäle und Spalten der erststandenen durchzieht. Die Inkompatibilität von Zementstein und Polymerdispersionen oder Monomeren ist Ursache, daß es nur vereinzelt gelungen ist, bedeutende Verbesserungen der Kompositeneigenschaften durch diesen Weg zu erreichen. Als erfolgreicher Weg hat sich die Bildung der sekundären Struktur aus Polymer im freien Raum völlig ausgehärteter primären Strukturen gezeigt (meist der anorganischen). In diesem Falle (Imprägnierung) füllt sich der Innenraum mit Monomer an, welches nachfolgend polymerisiert. Es wird damit vor allem eine hervorragende »Verdichtung« der Werkstoffe erzielt, die samt Interaktion der beiden kontinuierlichen Strukturen (von denen jede eigentlich Negativ der anderen ist) überraschend gute Erfolge bringt. Analoge Ergebnisse erreicht man durch Ausfüllen des freien Raums mit einem anderen anorganischen System (z. B. mit Schwefel), und oft können wir diesem Verfahren bei Imprägnierung von Zementbeton, Gips, Asbestzement, poröser Keramik oder Metall begegnen.

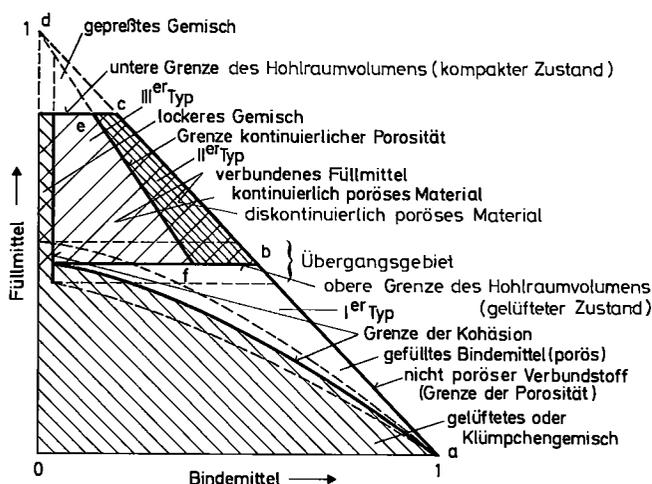


Bild 10. Granulat – Kompositensysteme (Volumeneinheit)

Der bewährte und gleichzeitig einfachste Weg zur Lösung jeden Problems ist nicht arbeitsaufwendige Beseitigung einzelner Nachteile und Mängel, sondern die Wahl eines neuen Systems, das scheinbare Nachteile ausnutzt und ins Gegenteil verkehrt. Das gilt in vollem Umfang auch für den Fall neuer Verbundwerkstoffe. Alles, was das Dichteverhältnis der Werkstoffe verbessert (sowohl im Maßstab der Werkstoffstruktur, als auch in der Mikrostruktur der Stoffe, aus denen die Werkstoffe zusammengesetzt sind) und dabei zur Fähigkeit die Energie zu akkumulieren seinen Beitrag leistet, führt zur Verbesserung der Eigenschaften, namentlich der Festigkeit. Insgesamt alles, was für solche Systeme, wie Zementbeton, Stein, Holz früher festgestellt worden ist, gilt auch für Polymerkompositen. Es wurde nicht durch eine Reihe von Experimenten mit PCC, PC und PIC<sup>1)</sup> bestätigt, sondern auch im Vergleich mit den Eigenschaften des kontinuierlich porösen PC, der ausreichend mit dem gleichen oder mit dem verschiedenen Monomer, aus dem er entstanden ist, imprägniert wurde. Es zeigte sich, daß PC als Komposite des III. Typs nach Imprägnierung wesentlich vorteilhaftere Eigenschaften aufweist als PC, das mit der gleichen Summenmenge von Bindemittel in der Form des Kompositen des II. Typs zubereitet war. Noch vorteilhaftere Eigenschaften wurden erreicht mit Imprägnierung mit einem anderen Monomer, dessen Eigenschaften sich nach Polymerisation von den Eigenschaften des ersten Polymer, aus dem PC zubereitet war, beträchtlich unterscheiden. Dadurch wurde nachgewiesen, daß bei Anwendung der gleichen Ausgangsmaterialien durch Bildung des Zweistruktur-systems eine bedeutend bessere Verwertung der Werkstoffe als mit Einstruktur-system erreicht werden kann. Durch die Wahl der Eigenschaften von beiden Strukturen kann man verschiedene Nachteile vermeiden (die aus innerem Spannungszustand als Folge der Bildung und Beanspruchung des Werkstoffes entstehen) und mit entscheidender Weise resultierende Eigenschaften beeinflussen. Die Zweistruktur-systeme sind besonders vorteilhaft auch darum, daß sie aufs Bremsen und Anhalten der entstehenden Mikrostörungen und Risse einwirken: die Störung in einer Struktur verursacht gewöhnlich nicht die Beschädigung, sondern bloß die Deformation der zweiten Struktur, erhebliches Energievolumen abschöpfend.

### Schlußfolgerungen

- Die einzige Lösung der wachsenden Ansprüche auf Werkstoffe und der verringernden Rohstoffquellen ist Ersatz der homogenen und quasihomogenen Werkstoffe durch Kompositenwerkstoffe.
- Die weitere Entwicklung der Kompositen ist durch Synthese der bisherigen Erkenntnisse und durch neuen Geist bei der Ausbildung von Konstruktions- und Materialingenieuren bedingt.

<sup>1)</sup> PCC=Polymerzementbeton, PC=Polymerbeton, PIC=Polymerimprägnierter Beton

- Das Verhalten der Kompositen richtet sich nach Grundparametern, und die Klassifikation der Kompositen nach Gewicht dieser Parameter in einzelnen Typen ist zur Verallgemeinerung der erreichten Erkenntnisse, zur Bewältigung der zielstrebigsten Schöpfung und zur Vorhersage der Kompositeneigenschaften unbedingt erforderlich.
- Grundgesichtspunkte der Klassifikation sind folgende:
  - ob die in die Matrize hineingelegte zweite (dispergierte) Phase segregiert ist (d. h. sie bildet nicht eigene Infrastruktur) oder ob sie aggregiert ist.
  - ob feste Phase den ganzen Raum ausfüllt oder ob auch fließbare Phase vorhanden ist,
  - ob fließbare Phase (Poren) segregiert (geschlossen), oder verbunden (geöffnet) ist, d. h. im Kontakt mit umliegenden Medium.
 Nach der Art des Raumanfüllens bestehen also Kompositen des I., II. und III. Typs mit beträchtlich verschiedenem Verformungs- und energetischem Verhalten. Sekundäre Unterscheidungszeichen sind geometrische Charakteristiken der Struktur (Isotropie, Anisotropie), geometrische und physikalische Phaseneigenschaften usw.
- Ein weiterer Gesichtspunkt ist, ob in Werkstoffen nur eine oder mehr verbundene feste Strukturen existieren. Die Mehrstruktur-systeme zeigen größere Effektivität (wrg. innere Energie) als die Einstruktur-systeme als die Folgerung physikomechanischer Eigenschaften der Kontaktfläche.

### Literatur

1. Bareš, R. A., Practical application of synthetic constructive materials as a result of exact definition of materials properties, RILEM-Symposium »Recherches et réceptions des matériaux de synthèse, utilisés dans la constructions, Liège, 1965, Le congrès et colloques de l'Université de Liège, vol. 52
2. N N, Les bétons de furane et leurs applications, Cahiers du centre scient. et techn. du bâtiment, Nr. 76, 1965, Nr. 647, S. 9–16
3. N N, Some basic features in mechanics of inhomogeneous materials, Proc. of Internat. Conf. on Mech. Behavior of Materials, Kyoto, 1972, vol. V, S. 42–53
4. N N, Les betons de resine à base des résines de furane – le berol, Bull. RILEM, 28, 1965, Resin concretes, S. 19–24  
Diskussion zum: C. K. Warren – Resin bonded concrete, Bull. RILEM, 28, 1965, S. 117–118, Resin concretes
5. N N, Issledovanije svojstv furanovo plastbetona kak dispersnoj struktury, Kolloidnyj zurnal, 3, 1967, Tom, S. 318–325
6. Maier, F., Die Entstehung des Porenvolumens im Beton und seine Beziehung zur Dichtung und Festigkeit, Der Bauingenieur, 1922, S. 558
7. Bareš, R. A., Furane Resin Concrete and its Applications to Large Diameter Sewer Pipes, Int. Symp. »Polymers in Concrete«, 1976, Mexico City, Publication SP-58, ACI, Detroit, 1978
8. Rehbinder, P. A., Formation of structures in disperse systems, Pure and Applied Chemistry, Vol. 10, 1965, London
9. L' Hermite, R., La résistance du béton et sa mesure, Ann. ITBTP, 1949, Nr. 62, 1950, Nr. 114
10. Chassevent, L., Dominé, D., Sur les variations de résistance des liants hydratés, Commémoration du centenaire de la naissance d' H. Le Chatelier, RM 1950
11. Bessey, G. E., The Relation between Strength and Free Water Content of Aerated Concretes, Mag. of Concrete Research, CCA, 1949, Nr. 3, S. 119 (2155)

# Ein neuer Plastifikator für Kunststoff-Abfälle

G. A. Patfoort, Hemelveerdegem-Lierde\*

*Georges A. Patfoort, ein international bekannter Konstrukteur für wirtschaftliche Baukonstruktionen aus Kunststoffen, hat sich auf der Suche nach billigen Grundstoffen auch mit dem Recycling beschäftigt und eine Maschine entwickelt, die er hier beschreibt.*

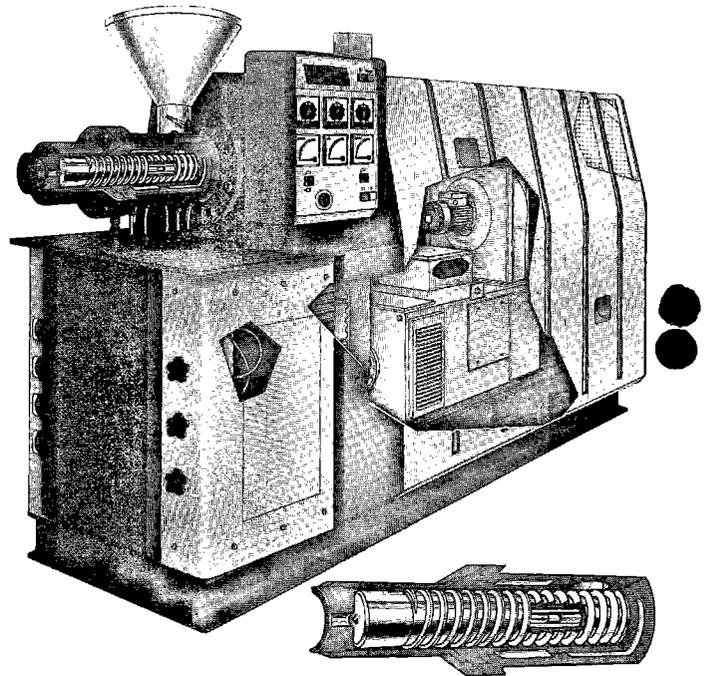
Untersuchungen über die Bildung von Polymermischungen standen am Anfang des Entwurfs einer Plastifiziermaschine mit besonderer Eignung für das Mischen von makromolekularen thermoplastischen Kunststoffen. Es hat sich gezeigt, daß die Maschine in der Lage ist, Mischungen mit interessanten mechanischen Eigenschaften herzustellen, selbst unter Verwendung von Polymeren, die als unverträglich gelten. Diese Möglichkeit hat ein wachsendes Interesse gefunden, besonders, nachdem die Wiederverwendung von Industrie- und Haushaltsabfällen sich als ökonomische Notwendigkeit herausgestellt hat.

Die Maschine ist auf den Prinzipien eines Extruders aufgebaut, aber ihre Fähigkeit, Mischungen herzustellen, beruht in der Hauptsache auf folgenden Charakteristiken:

- Im Gegensatz zu einer herkömmlichen Plastifizieranlage neigt die Maschine dazu, mit konstanter Viskosität und nicht mit konstanter Temperatur zu arbeiten. Diese Eigenschaft ergibt sich aus der Tatsache, daß die Temperatur durch Scherwirkung erzeugt wird. Die freigesetzte Energie nimmt mit der Viskosität und somit mit dem Temperaturanstieg ab. Daher gibt es für jedes Stoffteilchen eine, an seine thermischen Eigenschaften angepaßte Selbstregulierung der Viskosität.
- Das Druckelement ist vollständig von der Plastifizierung unabhängig. Es besteht aus einer, die Materie transportierenden, deren Rotation jedoch verhindernden Schnecke. Mit einer Schneckenlänge von 4-5 D kann ein beträchtlicher Druck in der Größenordnung bis zu 100 N/mm<sup>2</sup> erzeugt werden.
- Das Material wird durch Scherwirkung unter Druck plastifiziert und zwar zwischen dem Schneckenvorderteil und der Zylinderinnenwand in einer äußerst kleinen Zone. Der erreichte Dispersionsgrad erlaubt die Mischung von Polymeren als Emulsionen nach einer gewissen Verweilzeit bei gleichzeitiger Heizung von nicht mehr als 5-10 Sekunden.

Es wurden bisher sehr verschiedenartige Mischungen aus 2 Stoffen durchgeführt, u.a. PE/PS, PE/PVC, PS/PVC, PE/ABS, EVA/PC usw., obwohl die thermischen und chemischen Eigenschaften dieser Produkte äußerst verschieden sind. Die aus drei oder mehr Komponenten hergestellten Mischungen ergeben ähnliche Resultate. Das Einarbeiten von Füllstoffen ist leicht zu verwirklichen. So kann z.B. PP mit Holzabfällen oder Textilresten verarbeitet werden. Auch die direkte Wiederverarbeitung von Industrieprodukten, wie z.B. PVC-Bodenbelägen und schließlich auch von Haushaltsmüll ist möglich. In Belgien besteht dieser Haushaltsmüll im allgemeinen aus 30-40% PVC, 40-50% PE und 5-15% PS.

\* Prof. Ing. Georges A. Patfoort ist tätig für National Hoger Instituut voor Bouwkunst & Stedebouw, Antwerpen, C.R.I.F. Centre de Recherche Plastique, Liège, U.N.I.D.O., Wien



*Bild 1. Kurze Schnecke + Scheibenmühle: ein entscheidender Fortschritt*

*Die Zusammenwirkung der kurzen Schnecke des Plastifikators und der Mischscheibe ergibt eine kürzere Durchlaufzeit bei gleichzeitig gründlicherer Homogenisierung. Die kurze Schnecke hat die gleiche Wirkung wie in herkömmlichen Maschinen (führt zu, dosiert, mischt und homogenisiert), allerdings mit weit höherer Leistung sowohl in quantitativer (Reinigung, Fabrikationswechsel) als auch in qualitativer Hinsicht.*

Die aus Haushaltsmüll hergestellten Mischungen ergeben sehr homogene Werkstoffe mit einem Modul, der 1000 N/mm<sup>2</sup> übersteigt. Für viele industrielle Anwendungen sind die Werte sehr annehmbar. Die geeignete Verwendung von Füllstoffen und Zusätzen, von einem Prozentsatz an frischem Kunststoff oder von Verkopplungskomponenten erlaubt eine Erweiterung des Eigenschaftsprofils.

Ohne jeden Zweifel wurde ein bedeutender Schritt in Richtung einer Wiederverwendung von städtischen und industriellen Abfällen getan, denn ein Sortieren nach Art der Abfallprodukte ist nicht mehr erforderlich. Es wäre übrigens unlogisch, beim Müll den Polymeranteil durch Müllverbrennung oder Pyrolyse zu beseitigen, wo für die Synthese im Durchschnitt 100mal mehr Energie gebraucht wird als für die Wiederverwendung. Die synthetischen thermoplastischen Kunststoffe können, vom Energie- und vom wirtschaftlichen Standpunkt als die wichtigsten Produkte unter den Abfällen betrachtet werden.

Die z. Z. von der Fabrique Nationale in Herstal/Lüttich (Belgien) hergestellte Maschine hat mit einer kurzen Schnecke (Ø 120 mm) einen Durchsatz von weit mehr als 300 kg/h aus Haushaltsabfällen erzielt. (1219)