

# THEORETISCHE GRUNDLAGEN DER VERARBEITUNG VON THERMOPLASTISCHEN POLYMEREN

Von

I. MONDVAI und L. HALÁSZ

Lehrstuhl für Kunststoff- und Gummiindustrie, Technische Universität, Budapest

Eingegangen am 15. Oktober, 1975

Vorgelegt von Prof. Dr. Gy. HARDY

Die Kunststoffe finden in unserer Epoche breite und allgemeine Anwendung in allen Volkswirtschaftszweigen, indem 60–70% des Verbrauchs aus thermoplastischen Polymeren, unter ihnen hauptsächlich Polyolefinen, Polyvinylchlorid und Polystyrol bestehen. Aufgrund des ungarisch—sowjetischen Olefin-Abkommens breitet sich die Basis der heimischen Monomeren- und Polymerenproduktion beträchtlich aus. Diese Entwicklung erhebt notwendigerweise Anspruch auf die Förderung und wissenschaftliche Analyse der Verarbeitung und ihrer Prozesse.

Die grundlegende Zielsetzung des Zentralen Entwicklungsprogramms für Petrolchemie besteht darin, den vorgeplanten Kunststoffumsatz der Volkswirtschaft für den Zeitraum 1975–1985 in entscheidendem Maße aus heimischer Produktion und im Rahmen der sozialistischen Integration zu sichern. Außerdem soll die vollständige heimische Verarbeitung der Kunststoffproduktion realisiert werden [1]. Die Entwicklung der Verarbeitung verlangt die vielseitige und gründliche Untersuchung, die Klärung der theoretischen Grundlagen der Prozesse und die praktische Anwendung ihrer Ergebnisse.

Die theoretische Erforschung der Verarbeitungsverfahren ist in letzter Zeit intensiver geworden und brachte auf den Gebieten des Extrudierens, Spritzgießens und Kalandrierens vielsagende theoretische Ergebnisse. Für die einheitliche Deutung und systematische Erfassung der Verfahren wurden bisher relativ wenige Versuche gemacht. Dazu müssen zuerst die verarbeitungstechnischen Vorgänge als Operationseinheiten betrachtet werden. Weiterhin sollen das Gleichungssystem für die Beschreibung der Vorgänge, seine Lösungs-, Grenz- und Randbedingungen sowie die in der Beschreibung der Prozesse eine wesentliche Rolle spielenden rheologischen Zustandsgleichungen untersucht werden. In dieser Arbeit beschäftigen wir uns mit der allgemeinen Charakterisierung der Verarbeitungseinrichtungen für thermoplastische Polymere und mit der Aufstellung eines allgemeinen Gleichungssystems für die Beschreibung der sich in diesen Anlagen abspielenden Vorgänge.

Unter Verarbeitungsprozessen für thermoplastische Kunststoffe versteht man diejenigen mechanischen und thermischen Operationen, die auf die Her-

stellung eines aus beliebigem Rohmaterial bestehenden Endproduktes gerichtet sind. Während dieser Operationen unterliegt das Polymer nur physikalischen aber keinen chemischen Änderung. Die Ablaufschemas der wichtigsten Verarbeitungsprozesse sind in Abb. 1 dargestellt. Die Hauptanlagen haben drei miteinander eng verbundene Funktionen zu leisten: die Förderung des Rohmaterials in die Plastizierungszone, die Umwandlung des festen Polymers in eine Schmelze und die darauffolgende Homogenisierung im Schmelzzustand. An die Haupteinrichtungen (die als Schmelzeinheiten bezeichnet werden können) schließen sich die formgebenden Einheiten direkt oder indirekt an, die natürlich bei Mischanlagen entfallen. Am Ende des Verarbeitungsprozesses folgen die Abkühlung, das Kalibrieren und der Transport des Fertigproduktes mit Hilfe irgendeiner Hilfsanlage. Das allgemeine Charakteristikum der Verarbeitungsvorgänge besteht darin, daß das durch mechanische Energie- und Wärmezufuhr in Schmelze umgewandelte Rohmaterial homogenisiert in das Formwerkzeug geführt wird. Die effektive Form wird durch Abkühlung gefestigt und aus dem System tritt ein Fertigprodukt mit Raumtemperatur aus.

Für die weitere Untersuchung der Verarbeitungsprozesse ist es zweckmäßig, den Begriff der Operationseinheit einzuführen, deren drei Bestandteile das Arbeitsmittel, das Arbeitsgut und die gezielte menschliche Arbeit sind. Die gleichzeitige Anwesenheit, Wechselwirkung und Einheit dieser Komponenten sind die unerläßlichen Bedingungen für die Produktion der chemischen Industrie [2, 3]. In den chemischen Operationseinheiten ändert sich die chemische Zusammensetzung des Arbeitsgutes. Die Operationseinheiten der Verarbeitung von thermoplastischen Polymeren sind — wie schon erwähnt wurde — durch die sich in ihnen abspielenden physikalischen Änderungen gekennzeichnet.

Die Operationseinheit kann als ein System betrachtet werden [3]. Ein System ist ein Netz der Elemente, das mit seiner Umgebung in Wechselwirkung steht. Das Element ist ein Bestandteil des Systems; besteht das System aus einem einzigen Element, kann es als Eielement-System betrachtet werden. Infolge des engen Zusammenhangs, der zwischen den einzelnen Elementen des Systems besteht, wirken die Funktionen der einzelnen Elemente auf die der anderen. Das Systemverhalten wird durch das Verhalten der einzelnen Elemente und durch die zwischen ihnen auftretenden Modifizierwirkungen bestimmt.

Die Operationseinheiten können einfach oder zusammengesetzt sein. Die Gesamtheit der sich in einfachen Operationseinheiten abspielenden Prozesse verläuft irreversibel, d. h. sie werden von Entropieerhöhung begleitet, und die einfache Operationseinheit ist als Eielement-System anzusehen. Nach einer anderen Definition [2] sind die Operationseinheiten als einfache zu betrachten, wenn sich die eintretenden Strömungen höchstens einmal

miteinander vermischen. In zusammengesetzten Operationseinheiten spielen sich thermodynamisch gekoppelte Prozesse ab. In diesem Fall wird die Entropieabnahme in dem technologischen Hauptstrom durch den Entropiezuwachs des Nebenstroms gedeckt. Die Entropie der die Operationseinheit verlassenen Strömungen ist in jedem Falle größer als die der Summe der zugeführten Strömungen. Für das Zustandebringen und die Erhaltung des Nebenstroms ist eine zusätzliche Operationseinheit notwendig, wodurch sich das System in ein Mehrelementensystem umwandelt.

Ist ein Prozeß in einer Operationseinheit diskontinuierlich, so weit dort die in die Einheit eingeführte Materialmenge bis zu ihrer gewünschten Änderung. Tritt das umzuformende Material in die Operationseinheit fortlaufend ein und von dort aus, so ist das System kontinuierlich. Ist im ersten Fall die die gewünschte Änderung kennzeichnende Größe eine Funktion der Zeit, so wird sie im zweiten Fall unabhängig von der Zeit und eine Funktion des Orts sein. Ist eine Operationseinheit mit isolierter Wand versehen, so treten durch die Wand (abgesehen von den Ein- und Austrittsströmungen) keine Mengen-, Wärme- und Impulsströmungen auf. Ist diese Forderung nicht gewährleistet, ist die Operationseinheit offenwandig, und die Wand selbst wird als eine besondere Phase behandelt.

Bei der Verarbeitung von thermoplastischen Polymeren spielen sich rheologische (Spannung, Deformation), sowie Massen-, Energie- und Impulsstromtransport-Vorgänge ab. Diese Transportvorgänge sind mit Entropiezuwachs verbunden. Die Verarbeitungsprozesse können — wie es in Abb. 1 zu sehen ist — in Teilprozesse wie Materialförderung, Plastizierung, Schmelztransport, Formgebung und Abkühlung zerlegt werden. Die Operationseinheiten dieser Teilprozesse sind in Abb. 2 dargestellt.

Der physikalische Zustand des in die Operationseinheit ein- und von dort austretenden Materialstromes wird durch die Temperatur ( $T$ ) und den Druck ( $P$ ) gekennzeichnet. Die einzelnen Phasen werden mit F (fest), Sch (Schmelze); nach der Formgebung mit G (geformt) bezeichnet. Strömt die Wärme in die Operationseinheit ein, so wird die Bezeichnung  $+Q$ , in entgegengesetztem Fall die Bezeichnung  $-Q$  verwendet. Die in das System investierte Arbeit bezeichnen wir mit  $+L$ . Der Feststofftransport, die Schmelzhomogenisierung und die Formgebung sind in jedem Falle einphasige Operationen. Die Homogenisierung der Schmelze beim Extrudieren, Spritzgießen und Kalandrieren ist ein Einkomponentenvorgang, während sich die Homogenisierung im Innenmischer und im Walzwerk als Mehrkomponentenprozeß abspielt. Die zweiphasigen Vorgänge der Einkomponentensysteme sind das Plastizieren und die Abkühlung. Die Feststoffförderung, die Homogenisierung und die Formgebung spielen sich in einfachen, das Plastizieren und die Abkühlung in Phasenwechsel-Operationseinheiten ab.

Für die Beschreibung der Vorgänge sollen die Zusammenhänge der

Material- und Energieströmungen, die durch Stromstärke und Stromdichte gekennzeichnet sind, erfaßt werden. Die Stromstärke ist die zeitliche Änderung der gegebenen extensiven Größen (die sich der Ausdehnung proportional ändert, und sich bei aus Elementen aufgebauten Systemen den Volumenelementen ähnlich additiv summiert). Die Stromdichte bedeutet die in Normalrichtung der Oberfläche strömende, auf die Flächeneinheit wirkende Stromstärke. Der Strom wird durch die Inhomogenität der intensiven Größen (lokale, von der Ausdehnung unabhängige Größen, deren Kennwerte den für das ganze System erhaltenen Werten gleich sind), verursacht. Untersucht man ein einziges Volumenelement, so setzt sich die totale zeitliche Änderung der extensiven Größen aus den an der Grenzfläche des Volumens auftretenden Ein- und Austrittsströmungen sowie aus den durch Quellen und Senken im Volumen verursachten Änderungen zusammen.

Aufgrund dieser Erwägungen kann die allgemeine Form der Bilanzgleichungen aufgeschrieben werden. In einem gegebenen Volumenelement ist die zeitliche Änderung der  $i$ -ten extensiven Größe ( $\Gamma_i$ ):

$$\frac{d\Gamma_i}{dt} = Q_i - I_i, \quad (1)$$

wobei  $Q_i$  die in der Zeiteinheit entstandenen (positiven) oder verschwundenen (negativen) Größen,  $I_i$  die durch die Begrenzungsflächen des Volumens  $V$  ein- (negativen) oder ausströmenden (positiven)  $\Gamma_i$  Mengen sind. Für die Untersuchung der räumlichen Verteilung der physikalischen Kenngrößen ist es zweckmäßiger, die differentiellen Bilanzgleichungen anzuwenden. Für diesen Zweck sollen statt der den ganzen Raumteil kennzeichnenden Größen die lokalen Werte herangezogen werden. Sofern die Dichte der  $i$ -ten extensiven Menge  $\Gamma_i$  in dem kontinuierlichen Medium gleich  $\varrho_i$  ist, ergibt sich aus dem Volumenintegral der Dichte die im Volumen  $V$  enthaltene Menge zu:

$$\Gamma_i^{(t)} = \int_V \varrho_i(\mathbf{r}, t) dV. \quad (2)$$

Für die Quellendichte kann ein ähnlicher Zusammenhang aufgeschrieben werden:

$$Q_i^{(t)} = \int_V q_i(\mathbf{r}, t) dV. \quad (3)$$

Führt man die Stromdichte  $J_i$  der Menge  $\Gamma_i$  ein, so erhält man:

$$I_i = \int_A J_i dA. \quad (4)$$

Die Gleichungen (2–4) in den Zusammenhang (1) eingesetzt, nimmt die Bilanzgleichung die folgende Form an:

$$\frac{d}{dt} \int_V \varrho_i dV = \int_V q_i dV - \int_A \mathbf{J}_i d\mathbf{A}. \quad (5)$$

Das Flächenintegral von Gleichung (4) wird mit Hilfe des OSTROGRADSKI–GAUSS-Satzes in das Volumenintegral transformiert, und das Differential der Zeit in das Integral einbezogen:

$$\int_V \left( \frac{\partial \varrho_i}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{J}_i - q_i \right) dV = 0. \quad (6)$$

Der Wert des obigen Integrals kann unabhängig von den Integrationsgrenzen den Wert Null annehmen, wenn der Integrand gleich Null ist. So ergibt sich die lokale Bilanzgleichung:

$$\frac{\partial \varrho_i}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{J}_i - q_i = 0. \quad (7)$$

Aus dieser allgemeinen Form können die für die Beschreibung der einzelnen Operationseinheiten notwendigen und konkreten Bilanzgleichungen bestimmt werden, wenn die charakteristischen extensiven und intensiven Größen und die konkreten Formen der Quellendichte bekannt sind.

Bewegt sich das System, so setzt sich die Stromdichte aus zwei Gliedern — einem konvektiven (Förder-) und einem konduktiven (Leitungs-) Glied — zusammen. Die Strömung ist konvektiv, wenn sie mit makroskopischer Bewegung verbunden ist, und man erhält die Stromdichte als Produkt der entsprechenden Dichte und der Verschiebungsgeschwindigkeit:

$$\mathbf{J}_{i(F\ddot{o})} = \varrho_i \mathbf{v}. \quad (8)$$

Das konduktive Glied erfaßt die Strömung, die durch inhomogene Verteilung der extensiven Raumgrößen auftritt und keine makroskopische Bewegung aufweist:

$$\mathbf{J}_{i(L\ddot{e})} = -\alpha_i \operatorname{grad} \varrho_i. \quad (9)$$

Die konvektiven und konduktiven Strömungen besitzen ihre Gültigkeit nur bis zu der Phasengrenze. Bei Berücksichtigung der Strömungen zwischen den Phasen müssen die Bilanzgleichungen mit den die zwischenphasigen Material- und Energietransporte beschreibenden Transferströmungen ergänzt werden. Diese Strömungen werden durch den Flächenwiderstand und die zwi-

schenphasigen Triebkräfte hervorgerufen. Die Transferströmungen sind dem zwischenphasigen Dichtenunterschied und der zur Verfügung stehenden Oberfläche proportional:

$$j_i = \beta_i \frac{A}{V} \Delta q_i. \quad (10)$$

Die im Kontinuum vorhandenen Quellen und Senken verursachen auch die Änderungen der Raummenge. Die allgemeine Form der lokalen Bilanzgleichung (7) lautet unter Berücksichtigung der Gleichungen (8)–(10):

$$-\frac{\partial q_i}{\partial t} = \operatorname{div} (q_i \mathbf{v}) - \operatorname{div} (\alpha_i \operatorname{grad} q_i) + \beta_i \frac{A}{V} q_i - q_i. \quad (11)$$

Die in den Verarbeitungsprozessen eine wichtige Rolle spielenden Dichten  $q_i$  sind Masse-, Impuls- und Wärmedichten. In der Massenbilanz verwendet man statt der verallgemeinerten Dichte die Massendichte, die eine unmittelbare Zustandsgröße ist. In diesem Fall bedeutet die konduktive Strömung diejenige Diffusion, die von der makroskopischen Bewegung des Materials nicht abhängt. Bei mechanischen Bewegungen und Strömungen kann die kleine konduktive Strömung neben der beträchtlichen konvektiven Strömung vernachlässigt werden. Sind außerdem die Leitungs- und Transfer- sowie die Quellenglieder der Massenbilanz gleich Null, so vereinfacht sich die Gleichung (11) zu:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} (\rho \mathbf{v}) = 0. \quad (12)$$

Im Falle eines inkompressiblen Kontinuums nimmt die Ableitung nach der Zeit in der Gleichung (12) den Wert Null an.

In der Gleichung der Impulsbilanz steht die Impulsdichte (als Produkt von Massendichte und Geschwindigkeit). Die konvektive Impulsstromdichte ist eine Tensorgröße zweiter Ordnung, das dyadische Produkt der Vektoren  $\rho \mathbf{v}$  und  $\mathbf{v}$ . Die Dichte des konduktiven Impulsstroms ist ebenfalls ein Tensor zweiter Ordnung, der durch  $-\boldsymbol{\tau}_E$  und als Tensor des Spannungsüberschusses bezeichnet wird. Diese auf der Flächeneinheit wirkende und von dort hinaus gerichtete Kraft bedeutet den Impulsgewinn des untersuchten Systems. Für ein Medium in einem äußeren Kräftefeld macht sich die Feldwirkung der Umgebung als Impulsquelle geltend. Der sich mit theoretisch unendlicher Geschwindigkeit bewegende und in allen Punkten gleichzeitig eintreffende Impuls wird als Volumen-Kraftwirkung bezeichnet. Ist die auf die Masseneinheit bezogene Volumenkraft  $\mathbf{f}$ , so erhält man für die Kraftdichte  $\rho \mathbf{f}$ , und es ergibt sich die Impulsgleichung:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \operatorname{div} (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} - \boldsymbol{\tau}_E) = \rho \mathbf{f}. \quad (13)$$

Die für die innere Energie ( $U$ ) aufgeschriebene Energiebilanz ist:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} = - \operatorname{div} j_U - \operatorname{div}(\rho U \mathbf{v}) - \boldsymbol{\tau} : \operatorname{div} \mathbf{v}, \quad (14)$$

wobei das erste Glied der rechten Seite den konduktiven und das zweite den konvektiven inneren Energiestrom angeben. Das dritte Glied ist diejenige innere Energiequelle, die die aus Reibung entstandene innere Energiezerstreuung ausdrückt. Die Gleichung (14) beinhaltet nicht die aus eventueller latenter Wärme stammende innere Energiequelle, die zuletzt im dritten Glied (im Quellglied) erfaßt werden kann. Wird die innere Energie als Funktion von  $T$  und  $\rho$  betrachtet, so erhält man für ihr totales Differential:

$$dU = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_\rho dT + \left( \frac{\partial U}{\partial \rho} \right)_T d\rho. \quad (15)$$

Die Gleichung (15) kann durch Einführen der Zusammenhänge zwischen den thermodynamischen Zustandsgrößen umgeformt werden:

$$dU = C_V dT - \frac{1}{\rho^2} \left[ T \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho - P \right] d\rho. \quad (16)$$

Wird diese Beziehung nach der Zeit differenziert, und berücksichtigt man die Kontinuitätsgleichung für die Dichtenänderung, so erhält man mit Hilfe von Gleichung (14) die gebräuchliche Form für die Beschreibung der verarbeitungstechnischen Operationseinheiten:

$$\frac{\partial(\rho C_V T)}{\partial t} = \operatorname{div}(\rho C_V T \mathbf{v}) - \operatorname{div}(k_h \operatorname{grad} T) - T \frac{\partial P}{\partial T} \operatorname{div} \mathbf{v} + \boldsymbol{\tau} : \operatorname{div} \mathbf{v}. \quad (17)$$

Diese Gleichungen sind die tensoriellen Formen der Bilanzgleichungen. Ihre für die Beschreibung einzelner Operationen gebräuchlichen, in verschiedenen Koordinatensystemen abgeleiteten Komponenten sind in einer umfassenden Arbeit [4] dargelegt. Für die Lösung der Bilanzgleichungen, die für die Beschreibung der konkreten Operationseinheiten nötig sind, sollen die sog. Eindeutigkeitsbedingungen angegeben werden. Diese sind die folgenden: der Definitionsbereich der Variablen, die Rand- und Anfangsbedingungen und die Zustandsgleichungen. Der Definitionsbereich beinhaltet alle möglichen Werte der in den Gleichungen vorkommenden Variablen. Die Randbedingungen kennzeichnen die Wechselwirkung zwischen dem System und der Umgebung. Es sind drei Arten der Randbedingungen zu unterscheiden:

1. Die Funktionswerte am Rand werden angegeben (Dirichlet-Aufgabe).

2. Es wird der Gradient der Funktion in Normalrichtung angegeben (Neumann-Aufgabe).

3. Für einen Teil des Randes wird der Funktionswert, für den anderen der Gradient in Normalrichtung angegeben (kombinierte Aufgabe).

Durch die Anfangsbedingungen wird das System im Zeitpunkt des Versuchsbeginns gekennzeichnet. Bei der Polymerverarbeitung sind zwei Typen der Zustandsgleichungen von besonderer Bedeutung. Von diesen ist die die Deformationsänderungen des untersuchten Mediums beschreibende rheologische Zustandsgleichung von höherem Interesse. Die andere gibt als physikalische Zustandsgleichung die Zusammenhänge zwischen den Zustandsgrößen (Temperatur, Druck, Volumen) an.

Für die Bestimmung der Kenngrößen des Verarbeitungsprozesses sollen die Bilanzgleichungen unter Berücksichtigung der Eindeutigkeitsbedingungen gelöst werden. Im allgemeinen kann diese Aufgabe wegen der Kompliziertheit des Funktionssystems exakt nicht gelöst werden. Dafür sollen Vereinfachungsbedingungen bezüglich der Geometrie des Vorgangs, der Bilanzgleichungen, Zustandsgleichungen und der Materialkenngrößen gesucht werden. Da die einzelnen Bedingungen miteinander eng verbunden sind, können sie nicht streng gruppiert werden. So beeinflussen z.B. die geometrischen Bedingungen in großem Maße die für die Bilanzgleichungen herangezogenen Bedingungen. Das ganze Bedingungssystem der einzelnen Vorgänge werden wir bei ihrer ausführlichen Besprechung klären. Hier beschäftigen wir uns mit einigen grundlegenden Bedingungen.

Es ist zweckmäßig, die im allgemeinen komplizierte Geometrie der Verarbeitungsanlagen durch solche einfache Bedingungen zu ersetzen, bei denen die charakteristischen Raumkenngrößen der Prozesse (Geschwindigkeit, Temperatur, Druck) die minimale Anzahl der Koordinatenfunktionen ergeben, und die beste Annäherung der Wirklichkeit gestatten. Hängt eine Größe von mehreren Koordinaten ab, so ist es zweckmäßig, eine Geometrie zu wählen, wo die Funktionen nach diesen Koordinaten getrennt werden können. Zu diesem Zweck dient die Schmierungsannäherung [5–8]. Ändert sich ein Spalt unregelmäßig zwischen zwei, sich bewegenden oder stehenden Flächen, so ist die Spalthöhe eine Funktion des gewählten Ortes. In einem gegebenen Punkt können die lokalen Geschwindigkeits- und Temperaturprofile durch die entsprechenden Profile zwischen zwei ebenen Flächen ersetzt werden. Bei den ursprünglichen und den substituierten Spaltweiten sind die Geschwindigkeiten der Grenzflächen gleich, und der in der substituierten Geometrie herrschende Druckgradient nähert den der ursprünglichen Geometrie an. Diese Annäherung ermöglicht die Anwendung der Komponenten in Achsrichtung einer einzigen Koordinate der Strömungsgleichungen und die Reduktion der rheologischen Zustandsgleichung auf die Viskositätsgleichung der stationären Scherströmung.

Die Schmierungsannäherung kann nach den Erfahrungen für lange und enge Kanäle mit einer Steigung unter  $10^\circ$ , also beim Extrudieren, Spritzgießen, Kalandrieren und Mischen verwendet werden. Das ist eine grundlegende geometrische Bedingung, die sich sowohl auf das System der Bilanz- und Zustandsgleichungen als auch auf die Randbedingungen auswirkt.

Bei der Analyse der Verarbeitungsoperationen werden die vereinfachten Modelle der reellen Prozesse untersucht. Bei den verschiedenen Formen der Bilanzgleichungen können folgende vereinfachende Bedingungen getroffen werden:

1. Im strömenden System ist die Geschwindigkeit ungleich Null, und es tritt Konvektion auf; im ruhenden System ist die Geschwindigkeit gleich Null und es tritt keine Konvektion auf.

2. Im stationären Fall ist die lokale Änderung gleich Null, also sind alle zeitabhängigen Glieder gleich Null.

3. Bei der Verarbeitung von viskosen Polymeren können die Massen-, Inertie- und Zentrifugalkräfte gegenüber den viskosen und Druckkräften vernachlässigt werden.

4. Die zu verarbeitenden Polymere können als inkompressibel betrachtet werden.

In einigen speziellen Fällen verwendet man noch zusätzliche Annahmen.

Für die Untersuchung von Verarbeitungsprozessen ist die Beschreibung des stationären Betriebs von grundlegender Bedeutung. Ändern sich — unabhängig von dem Ort — die Stoffwerte des strömenden Materials in Abhängigkeit von der Zeit nicht, so ist die Operationseinheit stationär. Einige Verarbeitungsvorgänge (Extrudieren, Kalandrieren) können als stationär betrachtet werden, während die sich periodisch wiederholenden Vorgänge (Spritzgießen, Mischen) nur in dem Sinne als stationär gelten, daß die Prozeßabläufe in den einzelnen, aufeinander folgenden Zyklen übereinstimmen, d. h. daß in einem gegebenen Zeitpunkt und an einem gegebenen Ort die Stoffparameter gleich sind. Der stationäre Betrieb kann durch den Homogenitätsgrad, durch die auf die Arbeitsfläche wirkende Kraft, den Energieverbrauch und durch die Gütemerkmale des Fertigprodukts (Maßabweichung, Oberfläche, Festigkeit) gekennzeichnet werden. Für die Bestimmung dieser Parameter werden die für die einzelnen Operationseinheiten entwickelten mathematischen Modelle in ein einheitliches Modell zusammengefaßt, wodurch sich das Modell der zusammengesetzten Operationseinheiten, also des ganzen Verarbeitungsprozesses ergibt. Unter Anwendung dieses Modells können die Prozesse untersucht (Simulationen durchgeführt) werden, indem die wechselseitigen Zusammenhänge zwischen den technologischen, geometrischen und stofflichen Parametern berechnet werden. In Kenntnis des Modells kann bei gegebenen Parametern die Optimierung der Technologie durchgeführt werden. Das bedeutet im allgemeinen die Bestimmung des maximalen Umsatzes bei Einhaltung des

gegebenen Intervalls der für die Qualität bestimmenden Größen und des Wertes der dazu notwendigen anderen technologischen Parameter.

Ein anderes Untersuchungsgebiet ist der Übergangszustand, wenn der stationäre Zustand eines Systems durch die plötzliche Änderung eines Faktors modifiziert wird. In diesem Fall besteht die Aufgabe in der Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands, die mit Hilfe eines Regelsystems gelöst wird. Der Regelprozeß ist in Abb. 3 zu sehen. Der Istwert  $x$  wird kontinuierlich gemessen und mit dem Sollwert  $v$  verglichen. Dem Ergebnis dieses Vergleichs entsprechend ist der Wert  $x$  nach  $v$  zu regeln. Wird der sich in der Operationseinheit abspielende Prozeß durch ein äußeres Störsignal  $z$  gestört, so ist  $y$  die Stellgröße, die durch das Regelsystem in Abhängigkeit von der Abweichung kontinuierlich geändert wird. Der Zweck der Untersuchung der Übergangszustände besteht also in der Regelung der Verarbeitungsprozesse.

Das dritte Gebiet ist die Untersuchung der prästationären Bereiche (Anlauf- und Abstellbereiche), die für die Verarbeitung von geringerer Bedeutung ist und einen komplizierteren mathematischen Aufwand fordert.

**Tabelle 1**  
*Strömungen der Verarbeitungsprozesse*

Strömende Größe	Art der Strömung			
	Leitung	Förderung	Transfer	Quellen
Masse	$-\text{div}(D \text{ grad } \rho)$	$\text{div}(\rho \mathbf{v})$	$\beta_m^a \Delta \rho$	$G_m$
Komponente	$-\text{div}(D \text{ grad } C_i)$	Mischen		
		$\text{div}(C_i \mathbf{v})$	$\beta_k^a \Delta C_i$	$G_k$
Wärme	Plastizierprozeß bei Schneckenplastizierung, in den Spalten des Kalanders, Walzwerks und Innenmischers			
	$-\text{div}(k_w \text{ grad } T)$	$\text{div}(\rho U \mathbf{v})$	$\beta_w^a \Delta T$	$-\tau: \text{div } \mathbf{v}$
Impuls	Schmelzströmung bei Schneckenplastizierung, in den Spalten des Kalanders, Walzwerks und Innenmischers			
	Schmelzströmung in den Werkzeugen	$\text{Div}(\rho \mathbf{v} \circ \mathbf{v})$		Schmelzströmung in der Düse
	$-\text{div}(\eta \text{ grad } \mathbf{v})$ $-\text{div}(\tau_E)$		Feststoffbewegung	
		$\beta_i^a \Delta \mathbf{v}$	$\text{grad } P$	

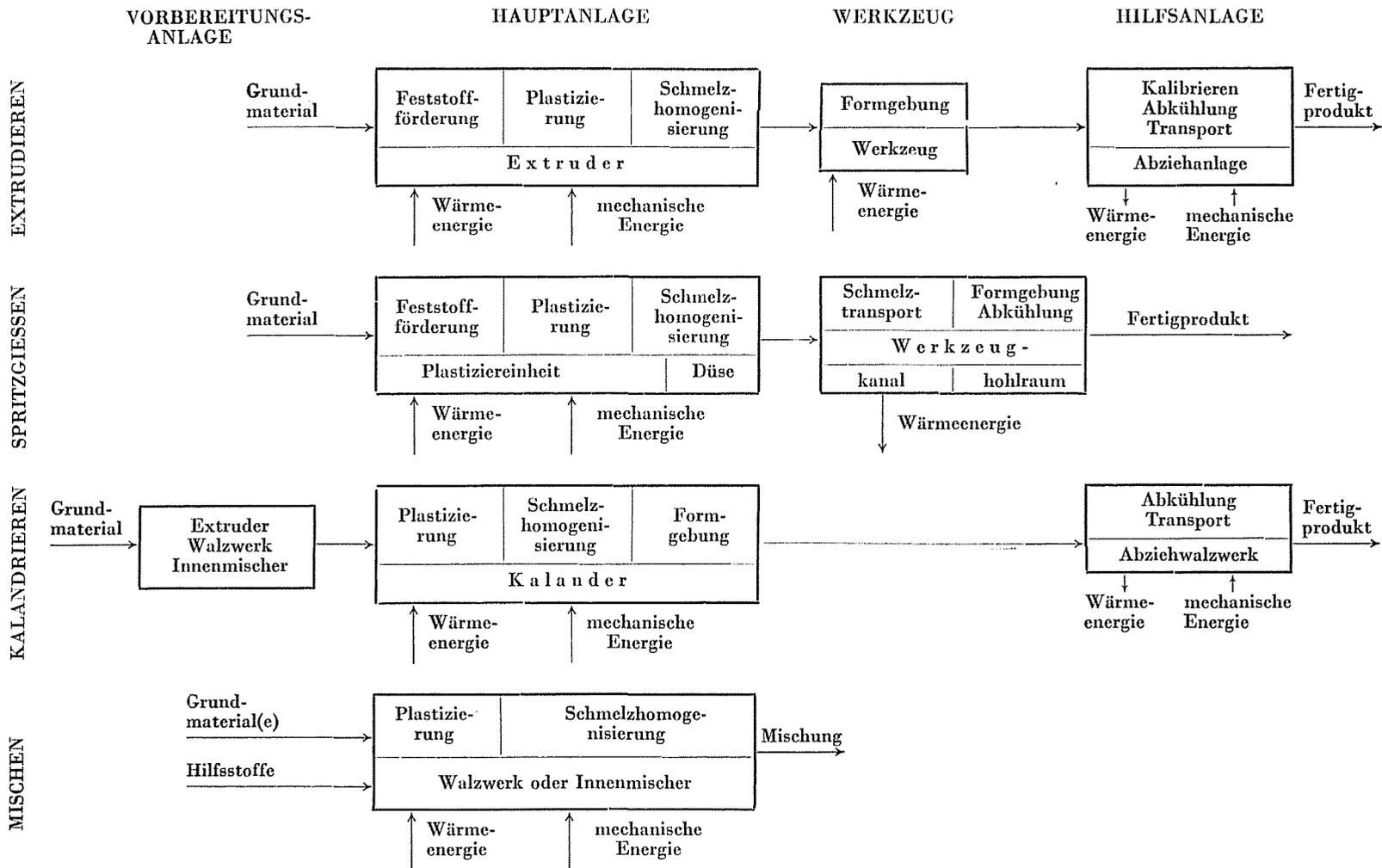


Abb. 1

### Zusammenfassung

Die verarbeitungstechnischen Vorgänge können als Operationseinheiten betrachtet werden. Der Beitrag beschäftigt sich mit der allgemeinen Charakterisierung der Verarbeitungseinrichtungen für thermoplastische Polymere und mit der Aufstellung eines allgemeinen Gleichungssystems für die Beschreibung der sich in diesen Anlagen abspielenden Vorgänge.

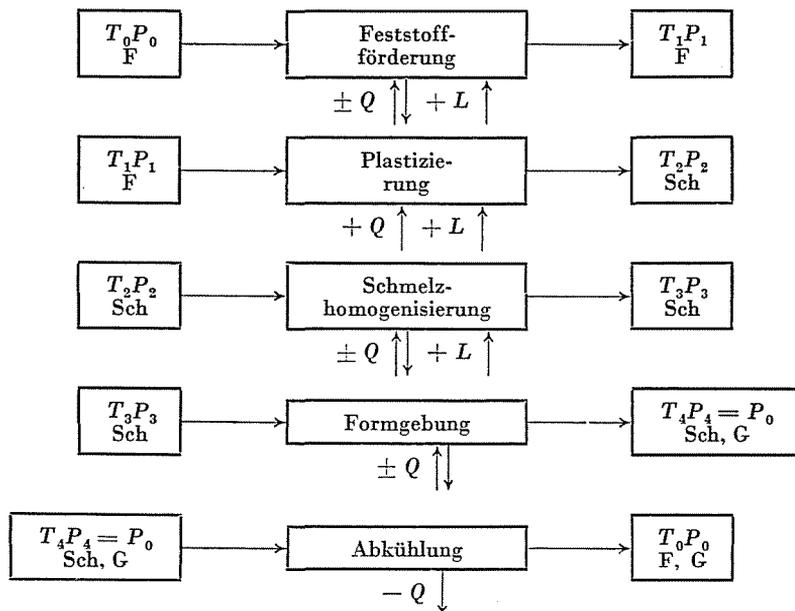


Abb. 2

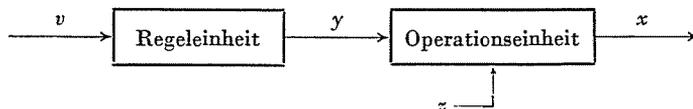


Abb. 3

### Literatur

1. SZEKÉR, Gy.: *Műanyag és Gumi* II, 257 (1974)
2. BENEDEK, P.—LÁSZLÓ, A.: *A vegyészmérnöki tudomány alapjai*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1964
3. BENEDEK, P.—ALMÁSY, G.—FARKAS, M.: *Bonyolult műveleti egységek matematikai simulációja*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1973
4. BIRD, R. B.—STEWART, W. E.—LIGHTFOOT, E. N.: *Transport Phenomena*, Wiley, New York, 1960
5. LANGLOIS, W. E.: *Slow Viscous Flow*, Macmillan, New York, 1964
6. PEARSON, I. R. A.: *Proc. Symp. on Solution of Nonlinear Partial Differential Equations*, Academic Press, New York, 1967
7. PEARSON, I. R. A.: *Mechanical Principles of Polymer Melt Processing*, Pergamon, London, 1966
8. PEARSON, I. R. A.: *Rubber Chem. Tech.* 41, 23 (1968)

Dr. Imre MONDVAI }  
 Dr. László HALÁSZ } H-1521 Budapest