

Die Formfüllung im voraus berechnen

Ole Johansen,
Lars S. Frederiksen

Um beim Spritzgießen die Formfüllung von Werkzeugen im voraus berechnen zu können, muß die Einspritzleistung der Maschine bekannt sein. Kenntnisse über das bei der Formfüllung entstehende Druckgefälle ermöglichen genauere Angaben, so daß das Verhältnis zwischen Einspritzleistung und Fließweg bzw. Materialstärke des Formteils optimiert werden kann. Eventuelle Mehrausgaben für höhere Leistung können durch geringeren Materialaufwand und kürzere Zykluszeiten ausgeglichen werden. Nur selten wird die Einspritzleistung in Maschinendatenblättern dokumentiert. Das Institut für Kunststofftechnologie der dänischen Technischen Hochschule hat eigene Messungen durchgeführt.

Summary:

Injection capacity of injection moulding machines p. 122

On the basis of the EURO-MAP 4 recommendation it has been possible to develop a measuring process which reliably relates rate of injection with the melt pressure during the mould filling process of an injection moulding machine, also in the case of machines equipped with servo valves mounted directly on the injection cylinder. Particular reference is made to the necessity of correct inaccuracies of measurement caused by the pressure loss in the hydraulic return lines from the injection cylinder. Test readings are utilised for the evaluation of several practical designs of hydraulic system.

Soll die Formfüllung von Werkzeugen im voraus berechnet werden, so sind Kenntnisse über die tatsächliche Einspritzleistung der Spritzgießmaschinen erforderlich. Dies ist sowohl in der Angebotsphase bei der Veranschlagung einer beabsichtigten Produktion interessant, da die Formfüllzeit in der Zykluszeit enthalten ist, als auch bei der eigentlichen Konstruktionsarbeit. Welchen Wert die errechneten Ergebnisse haben, hängt von der Zuverlässigkeit der Angaben ab, die man vom Maschinenhersteller oder aufgrund eigener Messungen erhält.

Die Einspritzleistung von Spritzgießmaschinen wird in den Maschinenprospekten durch den maximalen Einspritzstrom und den maximalen Massedruck ausgedrückt. Diese Angaben sind jedoch unzulänglich, denn ein wirklicher Arbeitspunkt der Maschine besteht für den Einspritzstrom und den Massedruck aus zusammenhängenden Werten. Die Höchstwerte geben demzufolge keine Auskunft darüber, ob die Maschine für einen bestimmten Zweck geeignet ist oder nicht.

Das Diagramm über die Einspritzleistung der Maschine ist hingegen eine Aufzeichnung möglicher Arbeitspunkte, ausgehend vom maximalen Ein-

spritzstrom, bei dem der Massedruck 0 bar beträgt, bis zum maximalen Spritzdruck, bei dem der Einspritzstrom 0 cm^3/s beträgt; dies entspricht der verfügbaren Einspritzleistung.

In Bild 1 ist ein typisches Leistungsdiagramm dargestellt. Die Maschine hat einen konstanten Einspritzstrom mit einem Massedruck von 0 bar bis zu 1400 bar, danach sinkt der Einspritzstrom auf 0 cm^3/s ab.

Entscheidend in diesem Diagramm ist der Knickpunkt, an dem die konstante Leistung in den abfallenden Verlauf übergeht, hier bei 1400 bar. Dieser Druck sollte so dicht wie möglich am maximalen Spritzdruck liegen. Die in Bild 1 dargestellte Kurve entspricht fast dem Idealfall.

Meßverfahren für die Einspritzleistung

Das empfohlene Meßverfahren für die Einspritzleistung basiert auf der Meßanordnung in Bild 2. Mittels eines Drosselventils kann der Ölstrom von der hydraulischen Steuerung verschiedenen Druckbelastungen ausgesetzt werden. Der aufgebaute Hydraulikdruck wird danach am Manometer abgelesen. Das entspricht dem Gebrauch der Maschine für Werkzeuge

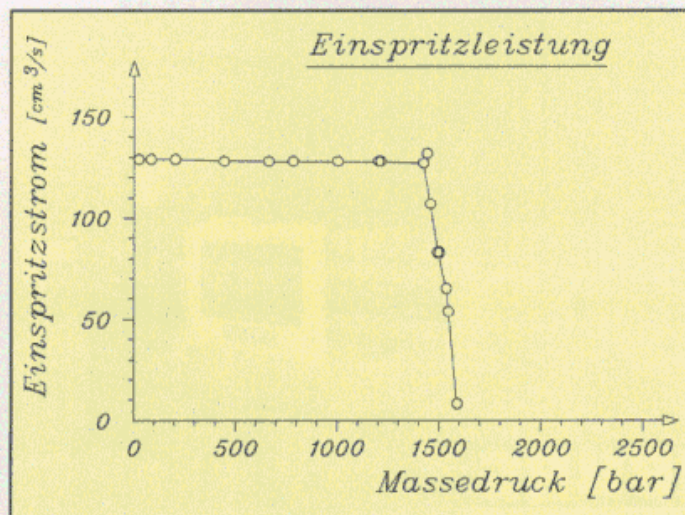


Bild 1 Diagramm über die verfügbare Einspritzleistung. Die gemessenen Werte der Schneckengeschwindigkeit und des Hydraulikdrucks sind umgerechnet in erreichbare Werte für den Einspritzstrom und den Massedruck. Die Digitalhydraulik der Maschine gewährleistet eine Leistung, die in einem sehr großen Druckbereich druckunabhängig ist

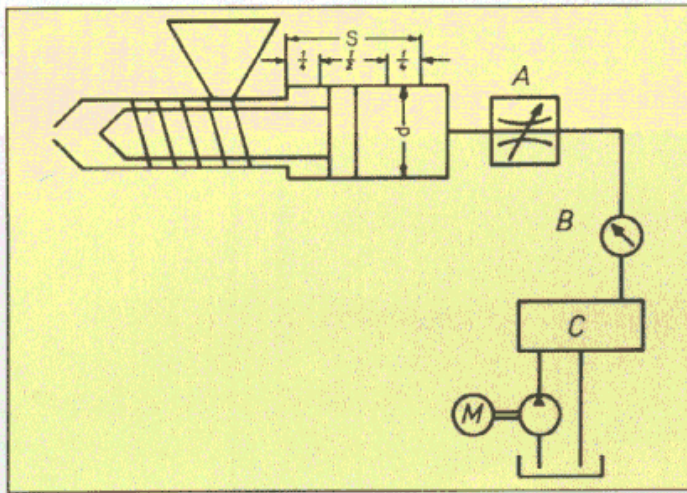


Bild 2 Die Meßanordnung nach Euromap 4 für die Ermittlung der Einspritzleistung.
A = Drosselventil
B = Manometer
C = hydraulische Steuerung

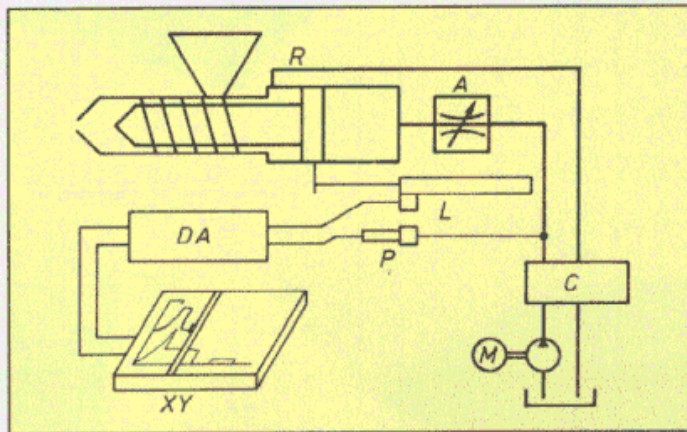


Bild 3 Die Meßanordnung für die Einspritzleistung basiert auf mikroprozessorgesteuerter Datenerfassungsausrüstung.
A = Drosselventil
C = hydraulische Steuerung
DA = Datenerfassungsausrüstung
L = Langweggeber
P = Druckgeber
XY = Schreiber im Format DIN A 3
R = Rücklaufleitung

mit unterschiedlich großem Fließwiderstand. Anhand der Zeit, die für die Bewegung der Schnecke durch die mittlere Hälfte des Hubs gemessen wird, wird der Einspritzstrom berechnet.

Aus den gemessenen Werten des Hydraulikdrucks und der Bewegungszeit werden dann die Kurven für das Leistungsdiagramm berechnet, in dem der verfügbare Einspritzstrom in Abhängigkeit des Massedrucks dargestellt wird. Um einen unmittelbaren Vergleich der Maschinen anstellen zu können, wurden die gemessenen Hydraulikdrücke in Massedrucke umgesetzt. Alle Massedrucke sind also ein umgerechneter Ausdruck für die hydraulische Kraft der Schnecke.

Mit der Mikroprozessor-Datenerfassung konnte die Meßanordnung nach Euromap 4 verbessert werden, da Hydraulikdruck und Schneckengeschwindigkeit gleichzeitig erfaßt werden.

Aus **Bild 3** ist die Meßanordnung ersichtlich. Das Drosselventil wird von Hand betätigt; das Meßprogramm wird durch stufenweises Schließen des Ventils durchgeführt. Hydraulikdruck und Schneckengeschwindigkeit werden in zusammengehörenden Kurven dargestellt (**Bild 4**). Jede Stufe entspricht jeweils einer Einstellung

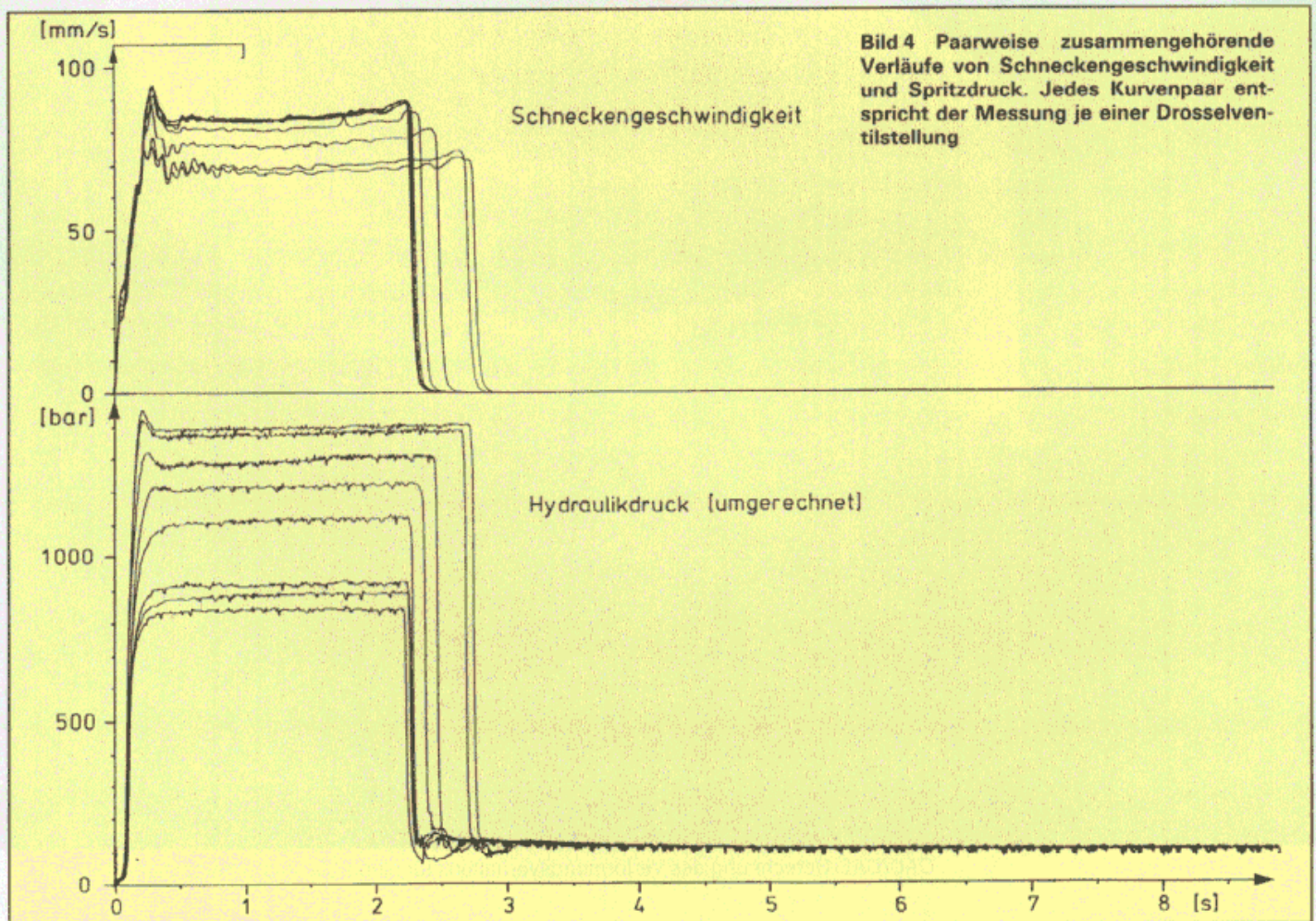


Bild 4 Paarweise zusammengehörende Verläufe von Schneckengeschwindigkeit und Spritzdruck. Jedes Kurvenpaar entspricht der Messung je einer Drosselventilstellung

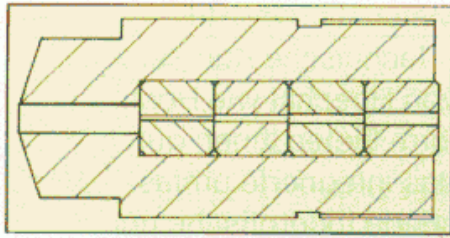
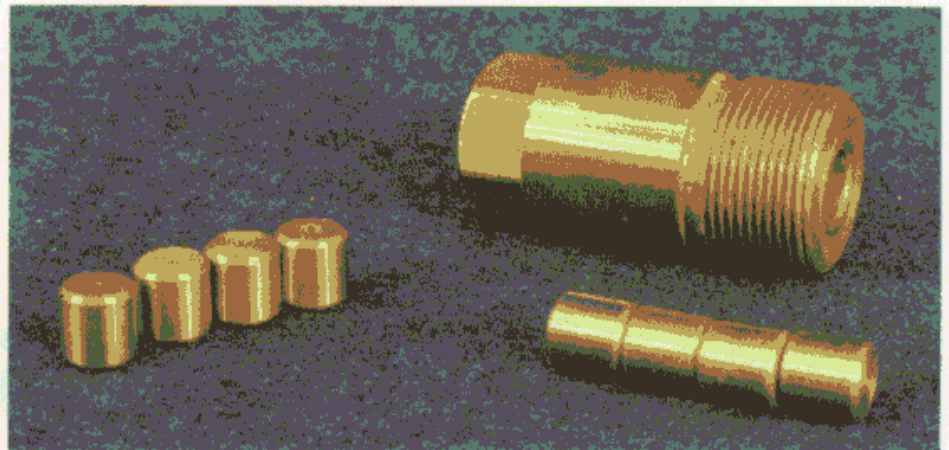


Bild 5 Maschinendüse als Ersatz für die hydraulische Drosselung bei Maschinen mit direkt am Spritzzylinder montiertem Servoventil. Durch Vergrößerung der Bohrungsdurchmesser in den vier austauschbaren Einsätzen variiert der Spritzdruck vom Maximaldruck der Maschine bis zu ganz wenigen bar



des Drosselventils.

Durch diese Verfahren können die Kurven viel genauer abgelesen werden als bei der Zeitmessung und dem Ablesen des Manometers nach der in Euromap 4 beschriebenen Anordnung der Fall ist. Die Zusammengehörigkeit von Druck- und Geschwindigkeitsmessung ist eindeutig. Das ist besonders für Akkumulator-Maschinen wichtig, bei denen der Druck aufgrund der Entladung des Akkumulators während der gesamten Meßdauer nachläßt. Daher wurde während des Gesamthubs der Schnecke gemessen und Druck sowie Geschwindigkeit dicht an der Endstellung der Schnecke abgelesen. An dieser Stelle ist die Akku-Entladung am größten, so daß der gemessene Einspritzstrom und Massedruck erreicht werden können, unabhängig davon, wie ein bestimmtes Werkzeug den Schneckenhub ausnutzt.

Bei vielen geregelten Maschinen ist das Servoventil direkt am Spritzzylinder angebracht. Es ist deshalb nicht möglich, das nach Euromap 4 empfohlene Drosselventil einzubauen. Statt dessen wurden Messungen durchge-

führt, bei denen der Einspritzstrom in der Maschinendüse gedrosselt wurde. Das erfolgt in der Maschinendüse (Bild 5), wo der Schmelzstrom mittels vier austauschbarer Einsätze mit unterschiedlichen Bohrungsdurchmessern geändert werden kann, so daß der Spritzdruck von einigen wenigen bar bis zum maximalen Spritzdruck der Maschine variiert werden kann. Bei jeder Druckstufe wird das Schußvolumen durch die Düse gespritzt, wobei Schneckengeschwindigkeit und Spritzdruck gleichzeitig registriert werden.

Von dem zusätzlichen Zeitaufwand für das Auswechseln der Einsätze abgesehen, eignet sich dieses Verfahren sehr gut für diesen Maschinentyp. Ein direkt montiertes Servoventil sollte also niemanden davon abhalten, die Einspritzleistung für eine Spritzgießmaschine zu ermitteln.

Bei einigen Maschinentypen kann ein erhöhter Spritzdruck gewählt werden. Bei nicht erhöhtem Spritzdruck wird die Rücklaufölleitung mit der Druckseite des Spritzzylinders verbunden (Differentialschaltung, Bild 6).

Dadurch wird die effektive Kolbenfläche reduziert, so daß eine erhöhte Einspritzgeschwindigkeit und ein entsprechend niedriger maximaler Spritzdruck erreicht werden.

Problematisch wird das Messen, wenn durch das Drosselventil auch das Rücklauföl gedrosselt wird. Dadurch entsteht in der Maschine ein Rücklaufölverlust, der lediglich auf die Meßanordnung zurückzuführen ist. Die Messung über die Maschinenleistung ist somit wertlos. Deshalb wird bei erhöhtem Spritzdruck gemessen.

Berechnung der verfügbaren Einspritzleistung

Es ist sowohl davon auszugehen, daß das Diagramm über die Einspritzleistung tatsächlich auch die zum Füllen des Spritzgießwerkzeuges verfügbare Leistung ausdrückt. Um dies zu gewährleisten, muß das Meßergebnis korrigiert werden. Dies ist in der Empfehlung Euromap 4 nicht vorgesehen.

Bei ganz geöffnetem Drosselventil wird ein Hydraulikdruck von mehr als 10 bar gemessen. Dieser Druck ist auf den Druckverlust des Drosselventils sowie auf den beim Ölrücklauf zum Öltank entstehenden Druckverlust zurückzuführen (Bild 3). Der Druckverlust im Drosselventil wird natürlich eliminiert, wenn die Meßanordnung abgebaut wird. Das gilt jedoch nicht für den Rücklaufölverlust. Deshalb muß die Leistungsmessung korrigiert und der Rücklaufölverlust, der bei der Meßanordnung nach Euromap 4 fälschlicherweise mitgerechnet wird, abgezogen werden.

Der Rücklaufölverlust wird anhand des Leerlaufdrucks p_0 (bei ganz geöffnetem Drosselventil) und des dazugehörigen Einspritzstroms Q_0 berechnet. Der verfügbare Spritzdruck p_v bei einem gemessenen Massestrom Q_M und

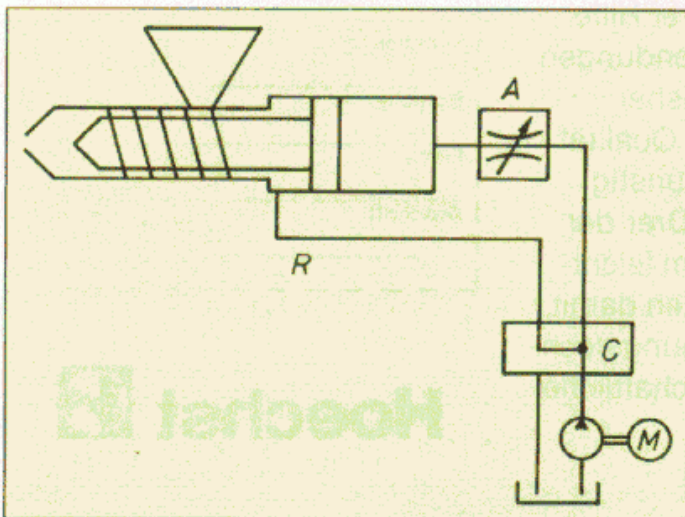
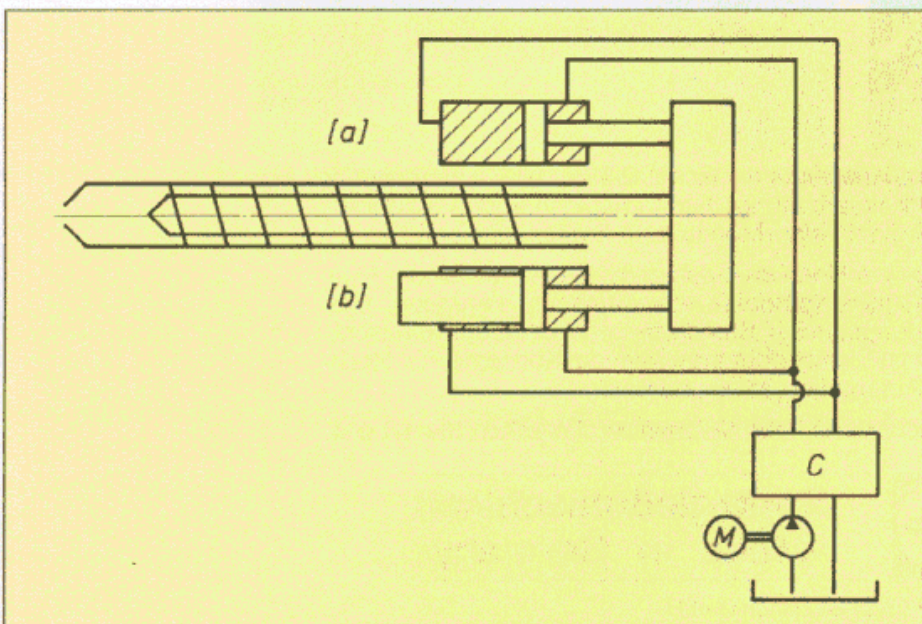
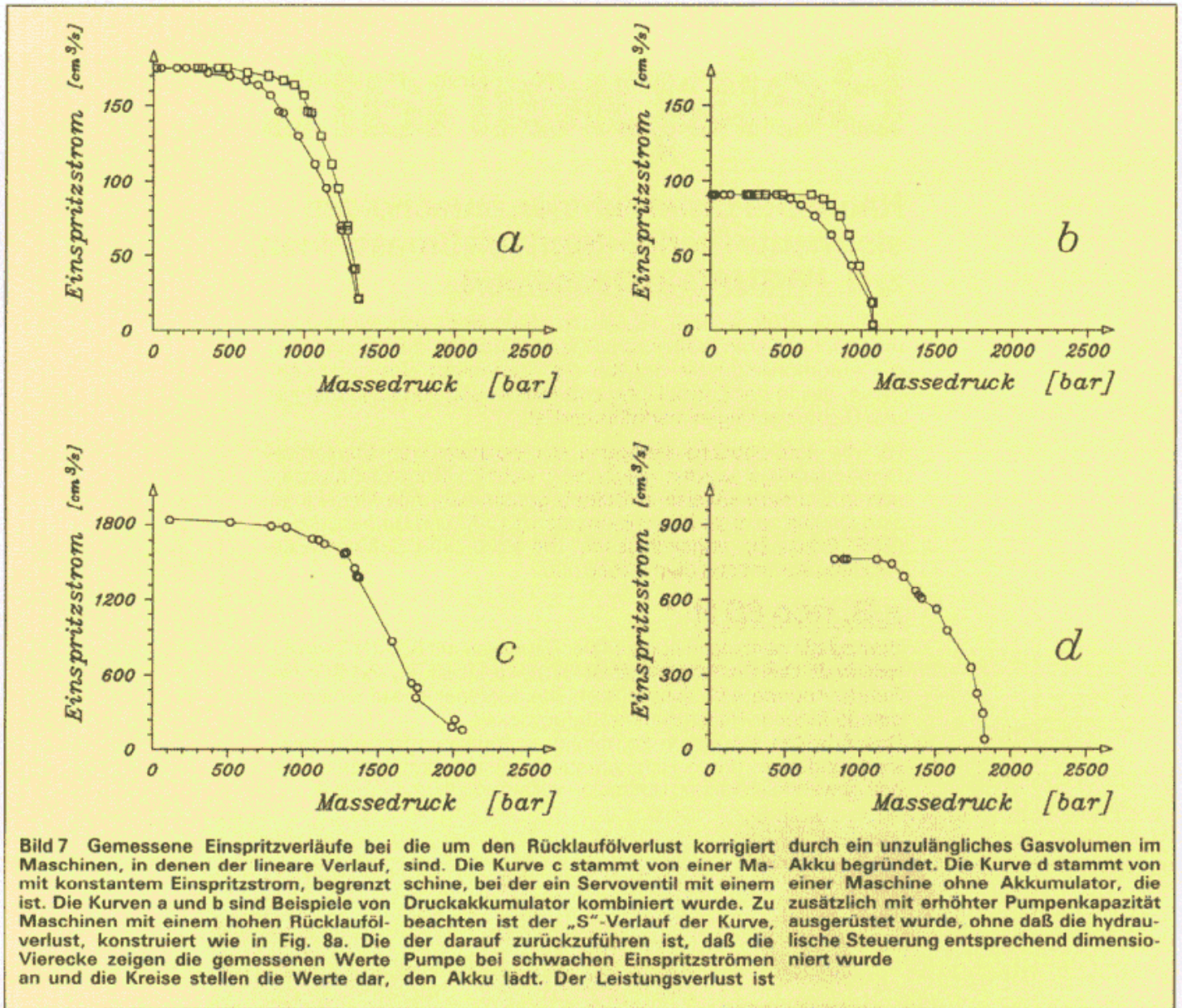


Bild 6 Das Prinzip der Differentialschaltung am Spritzzylinder. Die Rücklaufölleitung wird direkt an die Druckleitung zum Spritzzylinder angeschlossen. Dadurch werden eine erhöhte Schneckengeschwindigkeit und eine verminderte Kraft des Kolbens erreicht. A = Drosselventil B = hydraulische Steuerung C = Rücklaufölleitung



Massedruck p_M wird wie folgt berechnet:

$$p_v = p_M - (p_o - p_{D,o}) \cdot (Q_M/Q_o)^2;$$

$p_{D,o}$ ist der Druckverlust im Drosselventil, der in Abzug gebracht und deshalb beim verfügbaren Spritzdruck nicht mitgerechnet wird.

Die Bedeutung dieser Korrektur ist aus den **Bildern 7a** und **7b** ersichtlich, wo sowohl die gemessenen Werte

Bild 8 Der Rücklaufölverlust ist von der Konstruktion des Spritzzylinders abhängig.

a: Konstruktion mit großem Rücklaufölvolumen und somit unnötigem Druckverlust

b: Das Rücklaufölvolumen wurde reduziert und dem Bedarf bei der Kompressionsentlastung angepaßt

(Vierecke) als auch die korrigierten Werte (Kreise) eingezeichnet sind. Daraus ergibt sich in diesem Fall ein Druckverlust von 235 bar bzw. 240 bar, also ein bedeutender Teil der Pumpenleistung.

Es wurden keine Korrekturen wegen materialbedingter Verluste im Spritzzylinder vorgenommen. Die Messungen wurden bei leergelaufenem und

Durch die Anwendung einer durchgehenden Kolbenstange (Bild 8b) kann die Fläche an der Rücklaufseite reduziert und die Rücklaufölmenge wesentlich verringert werden. Maschinen, bei denen der Kolben hinten in Verlängerung der Schnecke angeordnet ist, benötigen an der Rücklaufseite ebenfalls eine viel kleinere Fläche. Die Größe dieser Fläche muß der der er-

scheidend für die Einspritzleistung, daß die Drucksenkung im Akkumulator nicht zu groß ist. Sonst ergibt sich dadurch eine Kurve, wie sie in Bild 7c dargestellt ist. Daraus ist ersichtlich, daß die Leistung von dem in der Hälfte des Druckbereichs der Maschine vorhandenen Druck abhängig ist.

Wenn dies vermieden werden soll, muß geklärt werden, ob das Stickstoffvolumen groß genug ist, und ob die Ölmenge im Akkumulator größer ist als das Spritzzylindervolumen. Stickstoffvolumen und Spritzzylindervolumen sind so aufeinander abzustimmen, daß der Druck im Stickstofftank nicht mehr als zulässig absinkt, z. B. 10% des maximalen Drucks, und zwar bei dem Gesamthub der Schnecke. Das Stickstoffvolumen muß mindestens um das Zehnfache größer sein als das Spritzzylindervolumen.

Der Fließwiderstand des Spritzgießwerkzeuges entscheidet darüber, ob die Einspritzleistung der Maschine ausreicht. Ausschlaggebend dabei ist, ob der Druckbereich mit konstantem Einspritzstrom überschritten wird. Wenn also der Formfülldruck größer wird als der Knickpunkt, fällt der Einspritzstrom analog zum Druckanstieg. Da der Fließwiderstand des Werkzeuges gleichzeitig analog zur Abkühlung der Schmelze wächst, verstärkt sich die Wirkung automatisch. Die Formfüllung erfolgt aus diesem Grunde unter zunehmendem Druck und bei abnehmender Geschwindigkeit; schlimmstenfalls kann der Füllvorgang beendet sein, bevor die Form ganz gefüllt ist (Bild 9).

Unterschiede in der Massetemperatur und der Werkzeugtemperatur führen zu Änderungen des Formfülldruckes und somit zu unterschiedlichen Formfüllzeiten. Das bedeutet eine instabile Produktion.

Ein steigender Formfülldruck hat den Effekt, daß der Schließkraftbedarf unnötig groß wird. Eine ausreichend hohe Einspritzleistung trägt deshalb zur Reduzierung des Schließkraftbedarfs bei. Mehrausgaben für die Einspritzleistung können somit verrechnet werden mit der Ersparnis, die durch eine kleinere Schließeinheit erzielt wird. Bei der Konstruktion neuer Spritzgießwerkzeuge muß bei der Bestimmung des zulässigen Fließwiderstandes und der erforderlichen Schließkraft von der Einspritzleistung der Maschine ausgegangen werden.

Die Festlegung der Leistungskurve ist daher eine wichtige Voraussetzung für die Gewährleistung einer vernünftigen Kombination von Werkzeug und Maschine.

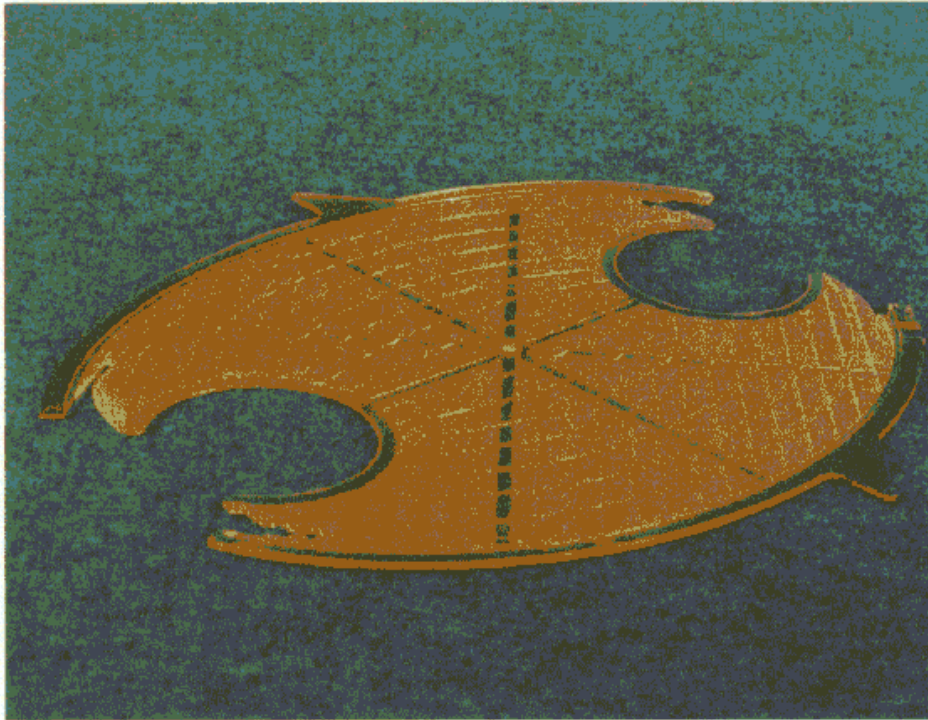


Bild 9 Unvollständig gegossenes Formteil aufgrund unzulänglicher Einspritzleistung im Verhältnis zum Fließwiderstand des Werkzeuges. In diesem Fall entschied man sich für eine Verminderung des Fließwiderstandes, wonach die Pro-

duktion befriedigend verlief. Es wurde ebenfalls mit einer mit Akkumulator ausgerüsteten Maschine ein Versuch unternommen, der auch zu einem befriedigenden Ergebnis führte.

betriebswarmem Zylinder durchgeführt. Der Einfluß des Materials, z. B. der Druckverlust in der Maschinendüse, ist demnach bei der Berechnung des gesamten Fließwiderstandes des Werkzeuges noch zu berücksichtigen.

Praktische Bedeutung

Der Rücklaufölverlust ist besonders bei Maschinen, in denen bei der Formfüllung große Ölmengen zum Öltank gedrückt werden, ein Problem (vgl. Bilder 7a und 7b). Hier werden Konstruktionen des Spritzzylinders verwendet, wie in Bild 8a dargestellt, wo sich das größte Ölvolumen auf der Rückseite des Kolbens befindet. Gleichzeitig ist die Leitung des Öltanks kleiner dimensioniert als die Druckleitung.

forderlichen Kraft der Kompressionsentladung angepaßt werden. Hoher Rücklaufölverlust beruht auf unzureichenden Kenntnissen über die Auswirkung der Einspritzleistung.

An der Druckseite des Spritzzylinders müssen Rohre und Ventile nach der vollen Leistung der Ölpumpe ohne wesentliche Verluste dimensioniert sein. In einigen Maschinen wird Druckverlusten z. B. durch die Anwendung von Cartridge-Ventilen entgegengewirkt.

Es können auch unerwünscht hohe Druckverluste entstehen, wenn eine Standardmaschine mit einer extrem hohen Hydraulikpumpenleistung ausgerüstet wird, ohne daß das übrige hydraulische System dem zusätzlichen Ölstrom angepaßt wird (Bild 7d).

Wird für das Einspritzen ein Druckakkumulator verwendet, so ist es ent-