



MEHRSTUFEN-VAKUUMVERFAHREN VACU² REVOLUTIONIERT DAS DRUCKGIESSEN

Druckgießen ist ein seit vielen Jahren bewährtes und erprobtes Verfahren bei der industriellen Massen- oder Serienproduktion von Konstruktionsteilen für unterschiedlichste Anwendungsbereiche. Bei diesem Prozess wird ein verflüssigter Werkstoff – die sogenannte „Schmelze“ – in eine Druckgussform gepresst, wo sie dann erstarrt.

Viele Gießereien machen sich bei diesem Prozess Vakuum zu Nutze. Pfeiffer Vacuum hat in einem gemeinsamen Projekt mit dem Beratungs- und Entwicklungsunternehmen für Gießerei Glimo N.V. ein bahnbrechendes Mehrstufen-Vakuumverfahren für Druckguss entwickelt – das Vacu².

Der Anspruch bei der Entwicklung dieses Verfahrens war groß: Es sollte ein den Druckguss revolutionierendes Vakuum-

verfahren werden, das die Nachteile der bestehenden Verfahren hinsichtlich des erreichten Vakuums, der Prozesssicherheit und der Prozesskontrolle beseitigt. Hierzu wurde Wissenschaft mit Praxis kombiniert – sowohl Berechnungen und Simulationen als auch aufwendige praktische Versuche sowie Messungen wurden durchgeführt.

Vakuum im Druckgießen

Die Aufgabe des Vakuumsystems in einer Druckgießanlage besteht darin, eine bestimmte Luftmenge innerhalb kürzester Zeit aus dem Formhohlraum und der Gießkammer zu evakuieren. Dadurch werden Lufteinschlüsse im Gussteil vermieden. Vakuum wird beim Druckgießen bereits seit mehreren Jahrzehnten angewendet.

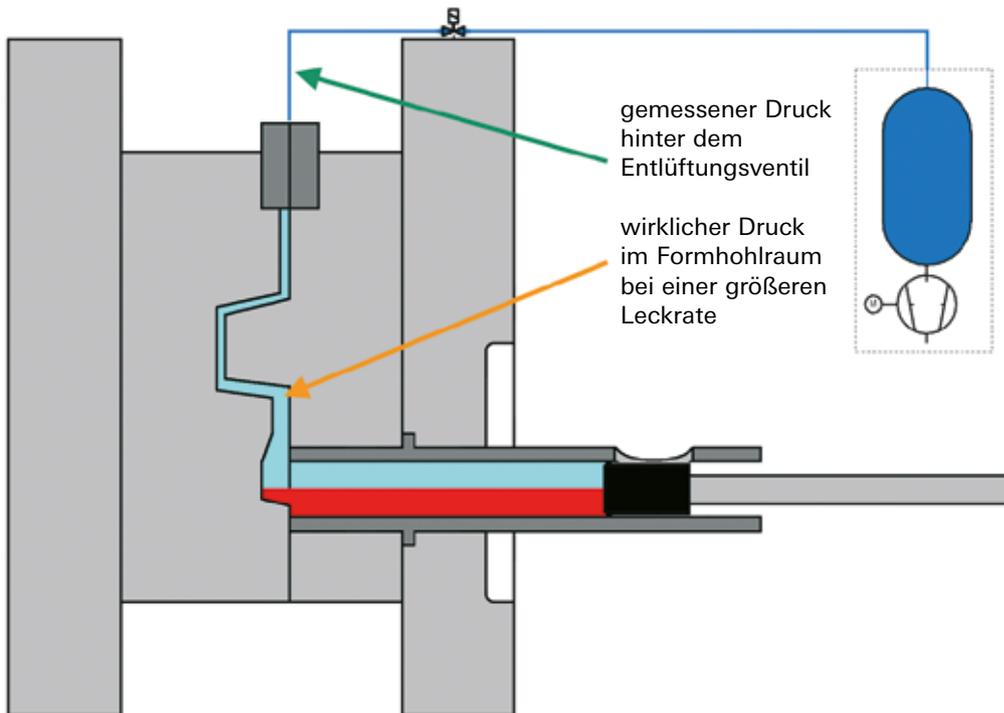


Bild 1a: Standard-Vakuumverfahren für Druckguss

Herkömmliche Vakuumverfahren – Nachteile und Schwierigkeiten

In der Vergangenheit haben sich vor allem zwei Verfahren etabliert:

- Beim „Standardverfahren“ (Bild 1a) wird, nachdem der Kolben an dem Einfüllloch der Gießkammer vorbeigefahren ist, ein auf Unterdruck gebrachter Behälter mit dem Formhohlraum in Verbindung gebracht
- Beim zweiten Verfahren (Bild 1b) wird bereits während des Metalldosiervorgangs evakuiert.

Bei beiden Verfahren wird die Verbindung zwischen Vakuumbehälter und Formhohlraum hauptsächlich über ein in der Form eingebautes Entlüftungsventil (Vakuumventil) hergestellt. Diese oft mit hohem Aufwand gefertigten Ventile sollen einerseits verhindern, dass Metall in das Vakuumssystem eintritt, andererseits aber trotzdem so viel Luft wie möglich aus dem Formhohlraum entweichen lassen. Solche widerstrebenden Anforderungen sind ein Grund dafür, dass einige dieser Ventile relativ störungsanfällig oder wartungsintensiv sind.

Zwei Ventiltypen sind auf dem Markt weit verbreitet:

- Mechanisch abschließende Ventile (Kolbenventile)
- Ventile, die durch Erstarrung in einem engen Spalt das Metall zurückhalten („Waschbrettventile“)

Insbesondere bei Aluminiumteilen, die wärmebehandelt oder geschweißt werden müssen, ist Vakuumdruckguss unumgänglich. Für alle anderen Bauteile gibt es bezüglich der Anwendung des Vakuumverfahrens eine Vielzahl von Schwachstellen, die bisher dazu führten, dass viele Druckgießer von der Verwendung von Vakuum zurückschreckten. Zu diesen Schwachstellen zählen zum Beispiel der Blockierungseffekt oder die verbesserungswürdige Prozessstabilität, die diese Verfahren aufwiesen. Genau an diesen Schwachpunkten setzt das Verfahren des Vacu² an.

Der Blockierungseffekt als Störfaktor

Die Hauptaufgabe eines Vakuumsystems an einer Druckgießmaschine besteht darin, eine bestimmte Luftmenge innerhalb weniger Sekunden aus dem Formhohlraum und der Gießkammer zu evakuieren. Die bisherigen Systeme müssen diese Luftmenge durch die engen Spalte des Anschnitts, die geometrischen Einengungen der Gießform, die Anbindungen der Überläufe, die Vakuumkanäle in der Form und nicht zuletzt durch das Entlüftungsventil herausziehen. Entsprechend schlechte Leitwerte sind zu erwarten.

Zusätzlich macht die Physik mit dem Blockierungseffekt einen Strich durch die Rechnung. Der Blockierungseffekt tritt bei bestimmten Druckverhältnissen an der engsten Stelle einer Leitung auf. Im günstigsten Fall, das heißt bei richtiger Auslegung des Vakuumsystems, ist dies das Entlüftungsventil.

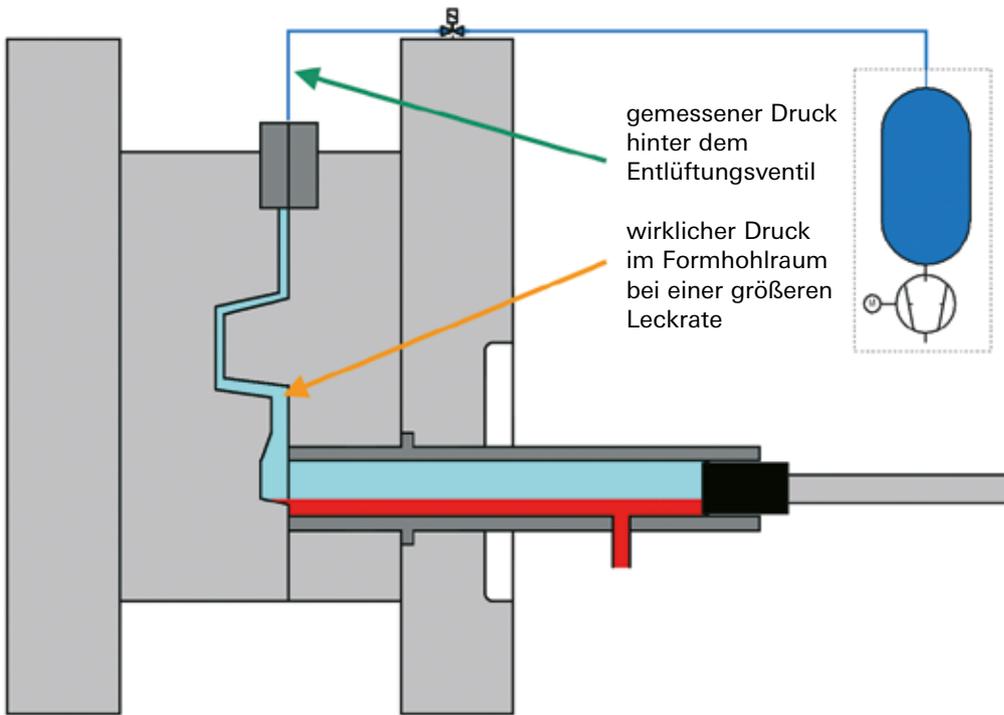


Bild 1b: Vakuumverfahren mit Metalldosierung während des Evakuierungsvorgangs

In dessen Querschnitt erreichen die Gase durch eine extrem adiabatische Expansion Schallgeschwindigkeit. Solange dieser Zustand anhält, kann die hindurchfließende Menge weder durch tiefere Drücke im Behälter noch durch Vergrößern des Vakuumbehälters erhöht werden.

Bei Berechnungen und Messungen stellte sich heraus, dass die zur Verfügung stehende Zeit beim Druckgießen in den meisten Fällen nicht ausreicht, um die erwünschten Vakuumwerte auch nur annähernd zu erreichen.

Schwierigkeiten bei der Prozessstabilität

Bild 2 zeigt einen typischen Druckverlauf, wie er bei Vakuumdruckgießverfahren üblicherweise auftritt. Die obere Kurve stellt den wirklichen Druck im Formhohlraum und damit das Hauptergebnis des Evakuierungsvorgangs dar. Leider konnte dieser Wert in der Vergangenheit nicht ohne Weiteres gemessen werden und blieb den Betreibern von Gießereien daher meistens vorenthalten.

Die untere Kurve repräsentiert die hinter dem Entlüftungsventil gemessenen Werte. Die wirkliche Druckkurve zeigt zuerst einen steilen Druckabfall, um dann bei einem bestimmten Wert zu nivellieren.

Unter anderem sind die Steilheit der Flanke und das letztendliche Druckniveau abhängig von mehreren externen, den Prozess bestimmenden Einflussfaktoren (Bild 6, Spalte 1). Die Kurve variiert in ihrer Form erheblich bei:

- Veränderung des abzusaugenden Volumens (Gussteilgröße, Kammervolumen, Anbindungen)
- Veränderung der Leckrate des gesamten Systems (Dichtigkeit der Form, des Kolbens)
- Veränderung der Leitwerte des gesamten Systems (hervorgerufen durch Verschmutzung, Verstopfung).

In den Bildern 2 und 3 ist als Beispiel der Einfluss der Leckrate auf das letztendlich erreichbare Vakuumniveau dargestellt. Darüber hinaus reicht in den meisten Fällen die vorhandene Zeit während des Druckgießprozesses nicht aus, um das

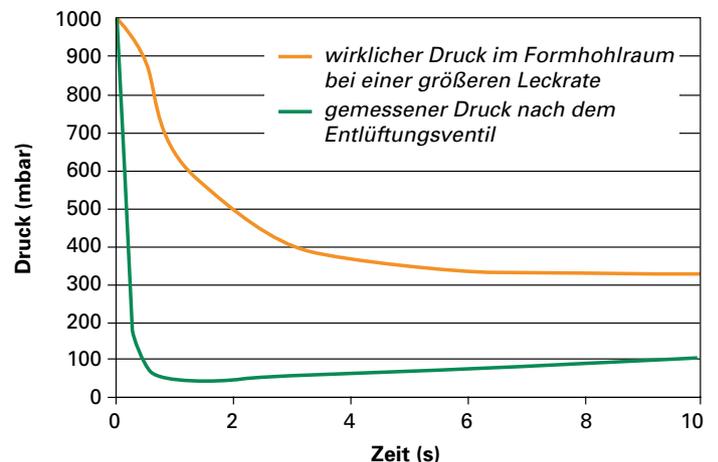


Bild 2: Gemessener und wirklicher Druck bei einer relativ undichten Form

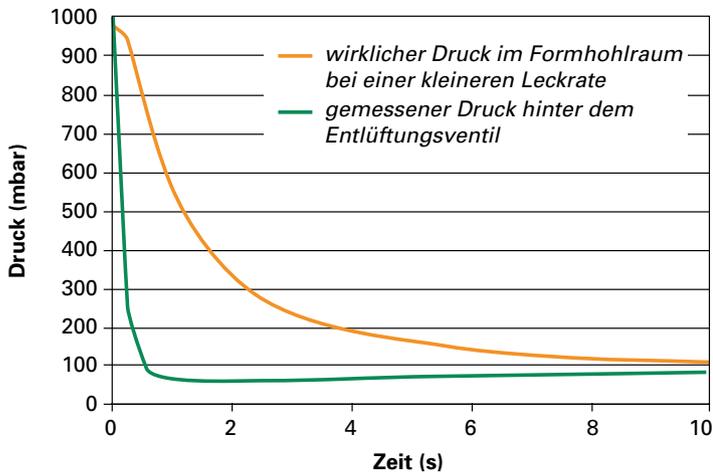


Bild 3: Gemessener und wirklicher Druck bei einer relativ dichten Form

genannte Vakuumniveau zu erreichen. Im noch steil verlaufenden Bereich der Kurve führen aber bereits kleine Prozessvariationen zu stark unterschiedlichen Ergebnissen. Schwankungen von über 100 % beim erreichten Vakuum innerhalb einer Gießkampagne sind dann keine Seltenheit.

Prozesskontrolle bei Standardverfahren mit Fehlerquellen

Bei Standardverfahren wird zur Prozessüberwachung eine Druckmessung hinter dem Entlüftungsventil durchgeführt.

Die Messung unterliegt mehreren Fehlerquellen in Bezug auf die Messung des erreichten Drucks oder der maximal eingeschlossenen Luftmenge:

- Die engen Querschnitte und das Auftreten des Blockierungseffekts lassen keine für den Druck im Formhohlraum relevante Messung im weiteren Verlauf der Leitung zu. Tatsächlich wird diese Messung mehr durch den Druck im Behälter beeinflusst als durch wirklichen Druck in der Form.
- Es handelt sich um eine dynamische Messung. Es ist bekannt, dass strömende Gase in einer Leitung durch ihre Geschwindigkeit einen zusätzlichen Unterdruck erzeugen. Das Messergebnis wird hierdurch verfälscht.
- Veränderungen der Leitwerte (Verschmutzung, Verstopfung) führen zusätzlich zu einem erheblichen Messfehler.

Die Bilder 3 und 4 zeigen, dass die wirklichen Druckwerte große Unterschiede aufweisen, obwohl die gemessenen (unteren) Druckkurven sich kaum unterscheiden.

Eine zuverlässige Relation zwischen dem Hauptparameter des Prozesses (= Vakuum in der Form) und dem Messwert kann nicht hergestellt werden.

Das Mehrstufenkonzept als optimale Lösung für das Druckgießen

Die Schwierigkeiten und Störfaktoren bei den Standardverfahren gaben die Impulse dazu, neue Wege zu gehen und ein

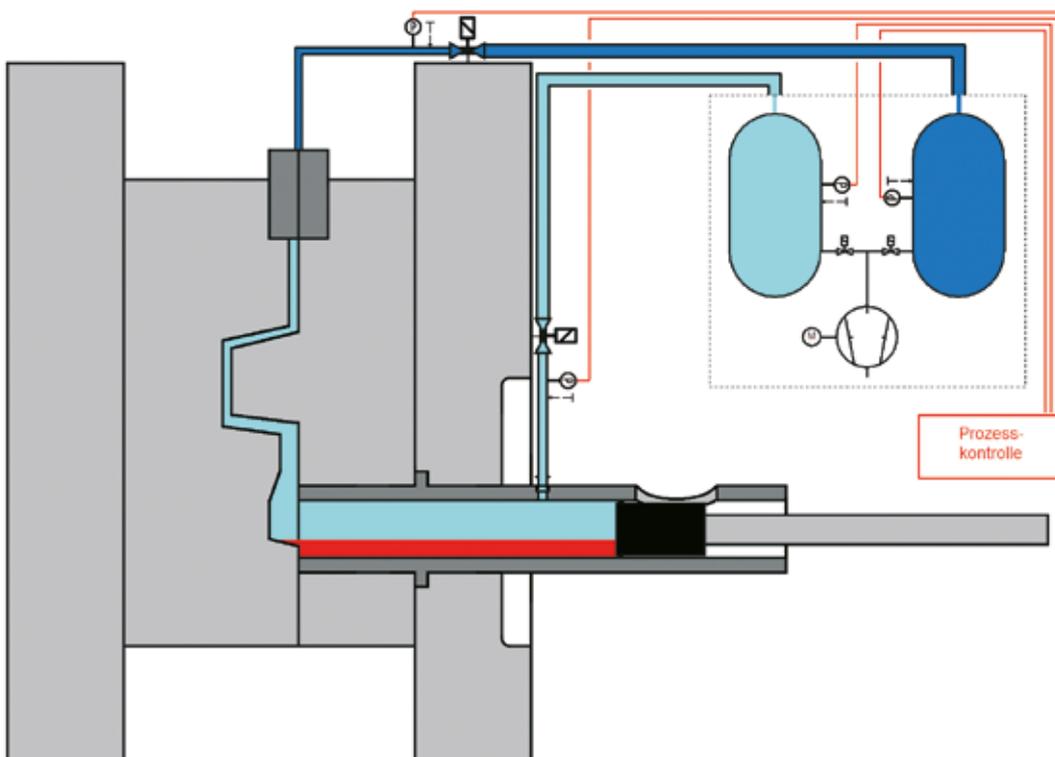


Bild 4: Prinzipskizze einer Variante des Mehrstufen-Vakuumverfahrens

Verfahren zu entwerfen, das den heutigen Anforderungen der Gießtechnik entspricht. Das Ergebnis: Das Mehrstufen-Vakuumverfahren Vacu² sowie die Energiespar-Version Vacu² eco.

Bild 4 stellt die Standardversion des neuen Verfahrens schematisch dar. Die gezeigte Lösung hat zwei Vakuumstufen und einen Direktanschluss an der Gießkammer. Abhängig von Maschinengröße, Füllgrad und erforderlicher Dichtheit des Kolbens sind auch Varianten mit einer Kammerabdeckung möglich.

Bei diesem neuen Mehrstufen-Vakuumverfahren werden zwei voneinander unabhängige, aber abgestimmte Vakuumstufen erzeugt. In der ersten Stufe wird ein unter Vakuum stehender Behälter über die Kammer mit dem Formhohlraum in Verbindung gebracht. Nachdem dieser Behälter wieder von der Gießkammer getrennt ist, wird die zweite Vakuumstufe eingeleitet. Hierzu wird ein weiterer Behälter mit dem Formhohlraum verbunden. Die Anbindung kann über eines der herkömmlichen Entlüftungsventile erfolgen. Danach werden die Behälter durch eine leistungsstarke, besonders auf den Vakuumdruckgussprozess abgestimmte Pumpenkombination wieder exakt auf die einstellbaren Vakuumstartwerte gebracht, damit für jeden Schuss die gleichen Ausgangsbedingungen vorliegen.

Behältervolumina

Beim Zweistufen-Verfahren können die Volumina und Ausgangsdrücke für jede Stufe des Verfahrens separat abgestimmt und eingestellt werden. Die völlige Unabhängigkeit der beiden Vakuumkreise führt bei richtiger Auslegung der Anlage zu einer Entkopplung der Einflussfaktoren (Bild 5, Stufen 1 und 2), sodass jeweils nur noch zwei Hauptvariablen die einzelnen Prozessstufen bestimmen. Die Entkopplung beider Vakuumstufen führt darüber hinaus zu einem Potenzierungseffekt beim theoretisch erreichbaren Vakuum. Da die zweite Vakuumstufe bereits bei einem vorevakuierten Raum ansetzen kann, werden mit einem Bruchteil des vergleichbaren benötigten Gesamtbehältervolumens bei einstufigen Verfahren wesentlich tiefere Druckwerte erzielt.

Prozessstabilität und erreichte Vakuumwerte

Der Druckverlauf beim Zweistufen-Verfahren unterscheidet sich völlig von dem des Einstufen-Verfahrens (Bild 6). Behältervolumen, Ausgangsdruck und Anschlussquerschnitte sind für die erste Stufe so ausgelegt, dass – im Gegensatz zu den bestehenden Verfahren – ein Gleichgewicht zwischen Behälter und Formhohlraum hergestellt wird. So kann bereits nach 0,5 bis 1,0 Sekunden ein Absolutdruck von etwa 50 mbar im Formhohlraum erreicht werden. Bei solch schnellen Vorgängen fällt die Leckrate kaum ins Gewicht. Die Druckkurven unterscheiden sich im Bereich der ersten Stufe nur marginal (Bild 6). Bedeutender Wärmeaustausch findet ebenfalls nicht statt, sodass adiabatische Zustandsänderungen der Gase

angenommen werden können. Den erheblichen Temperaturveränderungen, die bei einer adiabatischen Expansion entstehen, muss natürlich Rechnung getragen werden (Bild 5, Stufe 1).

Der Startwert zu Beginn der zweiten Stufe unterbietet schon bei Weitem die klassischen Verfahren. Da fast die gesamte Luftmenge bereits in der ersten Stufe entfernt wurde, ist die zweite Stufe nur noch in zweiter Ordnung vom Volumen und von der verfügbaren Zeit beeinflusst. Es findet sogar eine Umkehr der Stabilitätskriterien statt. Tatsächlich werden die Druckwerte sich umso weniger verändern, je größer das Teilevolumen des Gussteils und je geringer die restliche verfügbare Zeit ist (Bild 6, Stufe 2). Während der zweiten Evakuierungsstufe ändert sich das Druckniveau langsamer als in der ersten Stufe. Es kann sowohl steigen als auch fallen, je nach Leckrate und Leitwert des Gesamtsystems. Enddrücke von 20 mbar wurden bereits erreicht (Bild 7). Wichtiger noch als der Absolutwert ist der stabile Verlauf der Druckkurve. Variationen der Prozesskonditionen führen nur zu kleinen Veränderungen im erreichten Vakuum. Mit einer Einflussanalyse konnte nachgewiesen werden, dass Veränderungen in einer Stufe von der jeweils anderen Stufe gedämpft werden.

Durch diese veränderten Abhängigkeiten werden Formen mit höheren Leckraten, Schiebern, weniger aufwendigen Abdichtungen oder sehr großem Volumen prinzipiell dem Vakuumgießen zugänglich gemacht.

Prozesskontrolle ist Herzstück des Vacu²

Umfassende Prozesskontrolle ist eine zwingende Voraussetzung für moderne Produktionsverfahren. Die steigenden Anforderungen an Teilequalität, Prozessdokumentation und Kostenoptimierung führten dazu, dass moderne Gießanlagen über aufwendige Prozessüberwachungssysteme zum Verfolgen und Einstellen der meisten Prozessparameter verfügen. Vakuumanlagen als Teil von Gießzellen müssen mit dieser Entwicklung Schritt halten und in die Steuerung von Druckgießmaschinen integriert werden. Nicht nur der Hauptparameter „Vakuum“, sondern auch Veränderungen anderer prozessrelevanter, potenzieller Störungsvariablen wie Leckage oder Leitwert müssen überwacht und dokumentiert werden.

Die Prozesskontrolle ist deshalb das eigentliche Herzstück des neuen Verfahrens. Neben einer SPS-Steuerung, die die reinen Prozessabläufe regelt, verfügt die Anlage über eine Prozessüberwachung auf PC-Basis. So werden die aufwendigen, aber notwendigen Algorithmen in die Prozesskontrolle integriert. Mit dieser Hilfe kann bei jedem Schuss zeitnah das erreichte Vakuum sowie Abweichungen in Leck- und Durchflussraten ermittelt werden.

Voraussetzung für jede sinnvolle Berechnung sind natürlich richtige, ausreichende und präzise Messdaten. Um die grundsätzliche mathematische Unbestimmtheit des beschreibenden

Legende	herkömmliche Vaku- um- verfahren	Mehrstufenverfahren	
		Stufe 1	Stufe 2
<p>Legende</p> <p> Variable (Faktor) erster Ordnung</p> <p> Variable (Faktor) zweiter Ordnung</p> <p> kaum Einfluss</p>			
<p>Prozessbestimmende Einflussfaktoren</p> <p>abzusaugendes Volumen</p> <p>verfügbare Zeit</p> <p>Leckrate</p> <p>Leitwerte</p> <p>Entstehende Gase</p> <p>Temperatureffekte</p> <p>Wärmeaustausch</p>	<p></p> <p></p> <p></p> <p></p> <p></p> <p></p> <p></p>	<p></p> <p></p> <p></p> <p></p> <p></p> <p></p> <p></p>	<p></p> <p></p> <p></p> <p></p> <p></p> <p></p> <p></p>

Bild 5: Bedeutung der externen Einflussfaktoren bei den unterschiedlichen Vakuumverfahren

Gleichungssystem aufzuheben, wird folgender Ansatz gewählt:

- An vier Stellen werden Messungen mit hochgenauen Absolutdruck-Messsonden (Auflösung < 0,5 mbar) durchgeführt:
 - Durch die kleineren Behälter werden die Druckmessungen aussagekräftig
 - In den Leitungen können zu unterschiedlichen Zeitpunkten statische und dynamische Messungen durchgeführt werden
- Die für kompressible Medien geltenden Gesetzmäßigkeiten werden bei den Berechnungen berücksichtigt
- Die entkoppelten Parameter werden mathematisch als in erster Ordnung unabhängig voneinander betrachtet.

Bevor mit dem eigentlichen Gießen begonnen wird, werden unterschiedliche Tests durchgeführt. Diese dienen der Bestimmung der charakteristischen Werte des aus Druckgießmaschine, Form und Vakuumanlage bestehenden Systems. Sie können mit früher aufgezeichneten Daten verglichen werden. So wird sichergestellt, dass reproduzierbare Anfangsbedingungen herrschen und die Parameter in den erforderlichen Grenzbereichen liegen.

Während des Gießens wird der Prozess mittels fünf Parametern überwacht. Hiervon werden zwei direkt ermittelt und drei aus Messungen abgeleitet. Der wirkliche Enddruck im Form-

hohlraum sowie Veränderungen von Leckrate und Leitwert werden angezeigt. Die Überwachungsparameter werden jedem Schuss zugeordnet und dokumentiert. Sie können mit Eingriffs- und Störungsgrenzen versehen werden. Die Prozessparameter zu Beginn des Gießens werden zur Erleichterung beim Einstellen vom Prozessleitsystem vorgeschlagen.

Versuche und Ergebnisse

Das Vacu² System wurde in mehreren Gießereien an Druckgießmaschinen im Bereich von 7.000 bis 35.000 kN getestet. Um den Einsatzbereich des Verfahrens zu ermitteln, wurden Versuche an abgedichteten und nicht abgedichteten Formen sowie an Formen mit mehreren Schiebern durchgeführt. Bei allen Einsatzkombinationen konnten bezüglich des erreichten Vakuums und der Teilequalität ausgezeichnete Ergebnisse erzielt werden. Abhängig vom Einsatzfall wurden Absolutdrücke zwischen 20 und 100 mbar in der Form erreicht. Die Teilequalität wurde über

- mechanische Eigenschaften
- Röntgen
- Glühversuche
- Schweißtests

bestimmt. Bis zu einem Absolutdruck von 40 bis 50 mbar konnten deutliche Unterschiede in der Gussteilqualität nachgewiesen werden. Begleitend wurden die Charakteristika von

Entlüftungsventilen und Kolben sowie Einflüsse der Formgestaltung untersucht. Die simulierten Werte zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit den in der Realität gemessenen Werten und bestätigten die Prognosen in Bezug auf die Einflüsse von Volumina, Anfangsdrücken, Leitwerten, Leckagen und Temperatureffekten.

Ausblick: Kosteneinsparpotenziale und Anwendungsgebiete

Das neue Verfahren bietet dem Druckgießer ein vielfältiges Kosteneinsparpotenzial:

- Besseres Vakuum führt zu besserer Teilequalität
- Eine zuverlässige Prozessüberwachung senkt die Ausschussquote, da Abweichungen im Prozess frühzeitig erkannt und Abstellmaßnahmen eingeleitet werden können
- Eine bessere Prozesstransparenz beschleunigt die Optimierung des ganzen Gießprozesses, da „Trial and Error“-Prozeduren entfallen
- Durch die verringerte Abhängigkeit des Prozesses von Leckage und Leitwert kann der Aufwand beim Formbau verringert und genau auf die jeweiligen Anforderungen zugeschnitten werden.

Es werden weitere Möglichkeiten geboten, Vakuum nutzbringend anzuwenden, beispielsweise bei:

- Formen mit Schiebern oder einem großen Teilevolumen. Diese stellen nun kein grundsätzliches Hindernis mehr dar, wenn es um die Erzeugung von hochwertigem Vakuum geht.
- Einer breiteren Klasse von anspruchsvollen Teilen. Hier lohnt sich die neue Technik besonders.

Vacu² eco effiziente Lösung für geringe Kammervolumen

Die Energiespar-Version Vacu2 eco für Druckgussanlagen mit einer Schließkraft von bis zu 750 Tonnen ermöglicht die Anwendung des Mehrstufen-Vakuumverfahrens mit hoher Effizienz und niedrigem Energieverbrauch. Diese Variante ist ideal für geringe Kammer- und Formvolumen und bietet dank des geringen Energiebedarfs hohes Einsparpotenzial bei den Betriebskosten.

Das Mehrstufen-Vakuumverfahren erfüllt also alle Anforderungen der Prozesssicherheit und kann so als vollwertiger Teil des modernen Druckgießprozesses fungieren. Damit kann Vakuum in der Gießereibranche künftig nutzbringend, reproduzierbar und effizient eingesetzt werden.

Sie möchten weitere Informationen zum Mehrstufen-Vakuumverfahren Vacu² erhalten? Unsere Experten beraten Sie gern – sprechen Sie uns an!

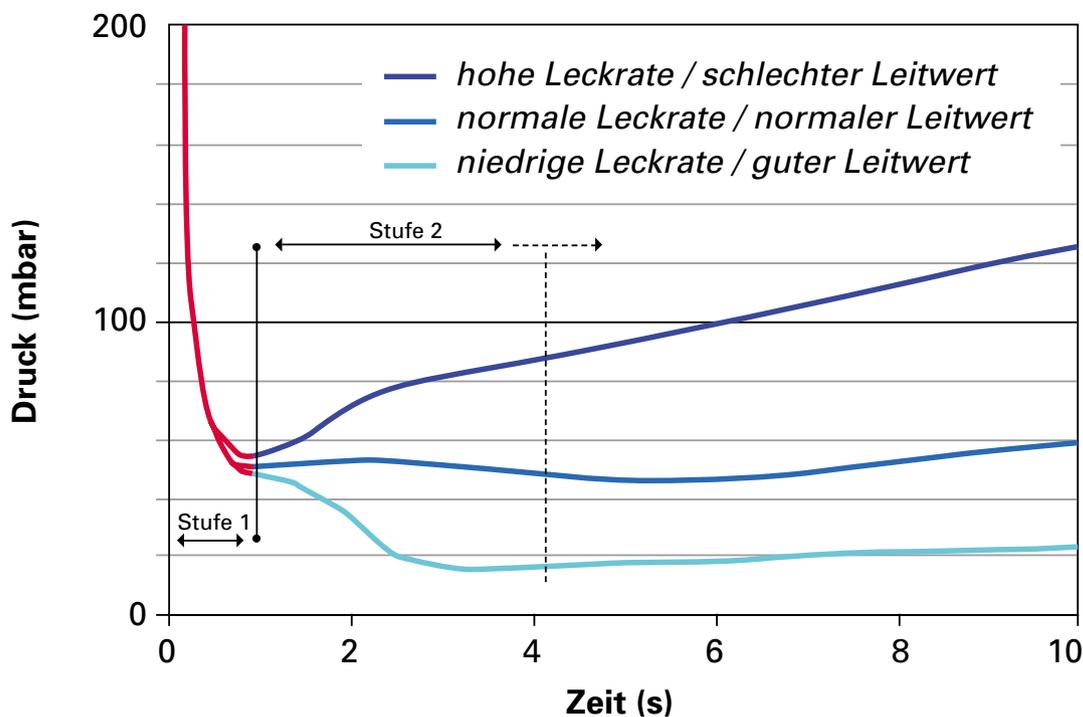


Bild 6: Wirklicher Druckverlauf in der Form beim Zweistufenverfahren

VAKUMLÖSUNGEN AUS EINER HAND

Pfeiffer Vacuum steht weltweit für innovative und individuelle Vakuumlösungen, für technologische Perfektion, kompetente Beratung und zuverlässigen Service.

KOMPLETTES PRODUKTSORTIMENT

Vom einzelnen Bauteil bis hin zum komplexen System:

Wir verfügen als einziger Anbieter von Vakuumtechnik über ein komplettes Produktsortiment.

KOMPETENZ IN THEORIE UND PRAXIS

Nutzen Sie unser Know-how und unsere Schulungsangebote!

Wir unterstützen Sie bei der Anlagenplanung und bieten erstklassigen Vor-Ort-Service weltweit.

Sie suchen eine perfekte
Vakuumlösung?
Sprechen Sie uns an:

Pfeiffer Vacuum GmbH
Headquarters · Germany
T +49 6441 802-0

www.pfeiffer-vacuum.com

PFEIFFER  **VACUUM**