Entwicklung einer Methode zur kontinuierlichen Qualitätskontrolle beim Nassgussformverfahren mit automatischen Formanlagen

Von der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik

der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

Dr.-Ing. (Kurzform)

vorgelegt

Dipl.-Ing. Andrej Malaschkin

geboren am 15.07.1975 in Donetsk, Ukraine

Gutachter.: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Bast, Freiberg Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Tilch, Freiberg Dr. mont. Stefan Hasse, Schaffhausen

Tag der Verleihung: 03.09.2002

von

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bast, meinem hochverehrten Lehrer, danke ich für die wissenschaftliche Betreuung und die wertvollen Hinweise bei der Durchführung der vorliegenden Arbeit.

Ich danke auch dem Herrn Prof. Dr.-Ing. Tilch für seine wertvollen Anregungen und Hinweise.

Ich danke ebenfalls allen Mitarbeitern des Lehrstuhls HGUM sowie des Gießerei-Institutes für die freundliche Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit, die maßgeblich zum Gelingen beigetragen hat.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Wissenschaftlich-technische Problem- und Zielstellung	8
3. Literaturrecherche / Stand der Forschung und Technik1	0
3.1. Methoden zur Bestimmung des Wirkungsgrades von	
Formmaschinen1	0
3.2. Methoden zur Qualitätskontrolle der Form1	5
3.2.1. Laboruntersuchungen1	5
3.2.2. Verfahren zur betrieblichen Qualitätskontrolle der Formen1	7
3.3. Dichteberechnung und Messungen der Beanspruchungen im	
Formstoff1	9
3.4. Konsequenzen	9
4. Erarbeitung der Messtechnik zur kontinuierlichen Bestimmung der	
Formeigenschaften2	5
4.1. Entwicklung der Sensoren2	5
4.2. Versuche zur Bestimmung der Funktionstüchtigkeit des Sensors2	8
4.2.1. Versuchsaufbau und –durchführung2	8
4.2.2. Diskussion der Versuchsergebnisse	0
4.3. Konsequenzen1	0
5. Methode zur Bestimmung der Formstoffdichte mittels Sensoranzeige4	0
5.1. Versuche zur Bestimmung der Abhängigkeit zwischen	
Formstoffdichte und Sensoranzeige4	0
5.2. Untersuchungen der Abhängigkeit Dichte = f (Sensoranzeige) für	
einen konstanten Formstoff bei den unterschiedlichen	
Sensorvorspannungen4	3
5.3. Untersuchungen der Auswirkung einer veränderlichen Fülldichte	
für einen konstanten Formstoff auf die Startdichte4	6
5.4. Untersuchungen der Abhängigkeit Dichte = f (Sensoranzeige) für	
einen konstanten Formstoff bei der Verdichtung von	
unterschiedlichen Formstoffmengen4	9
5.4.1. Versuchsergebnisse bei der Verdichtbarkeit des Formstoffes	
von 32,4 %5	0
5.4.2. Versuchsergebnisse bei der Verdichtbarkeit des Formstoffes	
von 50,5 %5	5

	5.5. Bestimmung der Rückfederung des Formstoffes auf der Basis der					
		Sensoranzeige	58			
	5.6. Genauigkeit der Methode zur Berechnung der Formstoffdic					
		der Basis der Sensoranzeige	60			
	5.7.	Konsequenzen	65			
6.	Ein	fluss der Formstoffzusammensetzung auf die Koeffizienten $ ho_{\scriptscriptstyle N}^{'}$ ur	nd			
	k'	67				
	6.1.	Einfluss der veränderlichen Verdichtbarkeit auf die Koeffizienten				
		ρ'_{N} und k'	68			
	6.2.	Auswirkung des veränderlichen Schlämmstoffanteils auf die				
		Koeffizienten k' und ρ'_{N}	71			
	6.3.	Bestimmung der Verschiebung der Kalibrierkurven bei				
		Verdichtbarkeitsschwankungen	73			
	6.3	3.1. Sensorpositionierung zur Einschätzung de	er			
		Kalibrierkurvenverschiebung	73			
	6.3	3.2. Bestimmung der Änderung des Koeffizienten $ ho_{\scriptscriptstyle N}^{'}$ auf de	er			
		Basis der Sensoranzeige bei Verdichtbarkeitsschwankungen	74			
	6.4.	Konsequenzen	85			
7.	Pra	aktische Überprüfung der erarbeiteten Messvorrichtungen sow	ie			
	Eic	h- und Berechnungsmethoden	86			
	7.1.	Erste praktische Versuche	86			
	7.2.	Prüfung der ausgewählten Messweise und Methode zur				
		Gewinnung der Kalibrierkurven	89			
	7.3.	Dauerversuche	96			
	7.4.	Software- und Ausstattungsbeispiele zur betrieblichen Gewinnun	g			
		der Kalibrierkurven und Dichteüberwachung	99			
	7.5.	Konsequenzen	. 102			
8.	Era	arbeitung von Methoden zur kontinuierlichen Bestimmung de	ər			
	Dru	uck- und Zugfestigkeit direkt an der Form sowie zur Einschätzur	ıg			
	der	, "formbezogenen" und "energetischen" Qualitätsmerkmale de	er			
	For	rmmaschinen	.103			
	8.1.	Erarbeitung einer Methode zur kontinuierlichen Bestimmung der				
		Druck- und Zugfestigkeit direkt an der Form	.103			

	8.2. Erarbeitung einer Methode zur Einschätzung der "formbezogenen"		
	und "energetischen" Qualitätsmerkmale der Formmaschinen	108	
9.	Zusammenfassung	113	
1(0. Literaturverzeichnis	114	

1. Einleitung

Die Aufgabe einer Gießerei wird durch die Art und Menge der zu fertigenden Gussteile, das geforderte Qualitätsniveau und den erzielbaren Erlös bestimmt. Steigende Anforderungen an die Gebrauchseigenschaften des Gussteils verlangen auch im Bereich der Formherstellung die zweckbestimmte Auswahl geeigneter Formstoffe, Formverfahren und Ausrüstungen.

Trotz des in den letzten Jahren feststellbaren Trends zum Einsatz neuer Formtechnologien erfolgte eine ständige Weiterentwicklung der Nassgussformverfahren. Relativ niedrige Formkosten, ein hoher Wiederverwendungsgrad, ein hoher Ausstoß von Gussteilen unter Einsatz neuer Verdichtungsverfahren und eine relativ problemlose Deponie ausgesonderter Altformstoffe sind wesentliche Gründe für die Anwendung dieses Verfahrens. Neue bzw. optimierte Verdichtungsverfahren zur geräuscharmen Fertigung von Formen unter günstigen energetischen, materialwirtschaftlichen und arbeitshygienischen Bedingungen stehen in enger Verbindung mit dem Bestreben nach einer Verbesserung der Produktqualität (Maßgenauigkeit, Oberflächengüte). Dies führte zu entsprechenden verfahrenstechnischen Lösungen (Hochdruckpressen, Vibrationspressen, Luftstrompressen, Impulsverdichtung, dynamische Impulsverdichtung). Diese neuen Verdichtungsverfahren eröffnen weitgehende Anwendungsgebiete (z. B. Fertigung von komplizierten Stahlbzw. Leichtmetallgussteilen) und verdrängen zunehmend die konventionellen Verdichtungsmethoden (Rütteln, Rüttelpressen, Slingern) [1].

Mit der Entwicklung und dem Einsatz der maschinellen Formtechnik wurde eine entscheidende Änderung der Produktionsweise in den Gießereien geleitet. Die Maschinen zur Herstellung der Formteile (Formmaschinen genannt) spielen im Formenkreis einer Gießerei die dominierende Rolle. Die Formmaschinen übernehmen in den Gießereien den eigentlichen Formbildungsprozess, der in drei wesentlichen Etappen abläuft:

1. Das Einbringen des Formstoffes in den Formkasten bzw. in die Formkammer der Maschine. Dieser Arbeitsvorgang kann durch zusätzliche Wirkprinzipien, wie Rütteln, Vibrieren, Blasen, Schießen, und Unterdruck (je nach Formmaschinekonstruktion) unterstützt werden. Der deutliche Einfluss dieses Schrittes der Formherstellung auf die erreichbare Formqualität berechtigt, von einem "Konturenvorbildungsprozess" zu sprechen.

- Die Verdichtung des lose bzw. vorverdichteten Formstoffes durch die Wirkung der Formmaschine. Dieser Vorgang wird als "Konturenverfestigungsprozess" bezeichnet.
- Das Ausformen, d. h. das Trennen der verdichteten Form vom Modell ("Konturenerhaltungsprozess) [1].

Die Formmaschinen können folglich nach den Prinzipen der Ausführung von diesen drei Schritten unterteilt werden. Die Vielzahl der Fertigungsmöglichkeiten und die Variabilität der einsetzbaren Anlagentechnik erschweren eine optimale technisch-wirtschaftliche Bewertung und Auswahl der Anlagen. Eine verallgemeinernde objektive Bewertung ist über folgende Kriterien möglich:

- Höhe der Verdichtung bzw. Formfestigkeit im Modellbereich,
- Dichteverteilung und Gleichmäßigkeit der Verdichtung in der Form,
- Reproduzierbarkeit der Formqualität,
- Taktzeit der Formmaschine,
- Energie- bzw. Kostenaufwand, der zur Gewährleistung der ausreichenden Formqualität von der Formmaschine bei der Ausführung der oben genannten Arbeitsschritte verbraucht wird.

Außerdem existiert eine weitere Reihe von Bewertungskriterien, die allerdings mehr mit technologischen (z. B. die Verwendbarkeit vorhandener Modelle) und verfahrenstechnischen (z. B. die Anforderungen an den Formstoff und die Formstoffaufbereitung) Fragen zu tun haben und deshalb in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet werden. Auf der Basis der oben dargestellten Bewertungskriterien ist es möglich, die Formmaschinen zu beurteilen und zu vergleichen.

2. Wissenschaftlich-technische Problem- und Zielstellung

Die beim Giessen in tongebundene Formstoffe erreichte Gussteilqualität hängt in hohem Maße von der Formqualität und deren Reproduzierbarkeit während des Fertigungsprozesses ab. Die Formqualität wird bei gegebener Modell- und Formkastengeometrie sowie geeigneter Formstoffbeschaffenheit von der Verdichtungswirkung der Formmaschine bestimmt. Zur Beurteilung eines Verdichtungsvorganges sind folgende Größen maßgebend:

- a) die Formstoffdichte,
- b) die Formfestigkeitskennwerte und
- c) der Energie- bzw. Kostenaufwand.

Deshalb zählen einerseits die Qualität der hergestellten Formen (Formfestigkeit, -dichte) sowie deren Reproduzierbarkeit und andererseits der Energieaufwand, der von einer Formmaschine zur Einstellung einer bestimmten Formqualität geleistet wurde, zu den wichtigsten Kriterien bei der Einschätzung des Wirkungsgrades einer Formanlage.

Den Gussproduzenten interessiert vor allem die aus Form- und Schmelzequalität sowie Gießtechnologie resultierende Gussteilqualität. Der Wirkungsgrad des Formherstellungsprozesses wird derzeit noch als unwesentliche Größe betrachtet. Die Auswahl sowohl der Formstoffe als auch der Verdichtungsweise und die Einstellung der Formmaschinenparameter auf ein bestimmtes Produktionssortiment erfolgen deshalb bis zur Gegenwart keinesfalls auf der Basis der Messungen der Formqualitätskennwerte direkt an der Form und des dazu gehörigen Energieaufwandes der Formmaschine. In der Fachliteratur werden die Neukonstruktionen von Formmaschinen auch größtenteils mit unverkennbaren Werbeabsichten beschrieben. Das geschieht vor allem dadurch, dass die Empfindlichkeit der in der Gießereipraxis üblichen Methoden zur betrieblichen Einschätzung der Formqualität bei den heute üblichen Verdichtungsgraden meist unzureichend ist (Formhärtemessung). Die z. B. durch Formhärtemessung ermittelten Größen dienen nur indirekt als Nachweis der Formqualität in dem Sinne, dass durch diese Messungen die Werte der Formstoffdichte und -festigkeit im Messpunkt nicht bestimmt werden können. Diese Formeigenschaften sollten im Idealfall bei jeder hergestellten Form bestimmt werden, da die Vernachlässigung solcher Prüfungen die häufigste Ursache des Gussausschusses darstellt. Die zur Zeit in der Praxis vorhandenen Prüfmethoden werden meist von Hand durchgeführt und deshalb oft nicht realisiert. Andererseits fehlen einfache, sichere und betrieblich anwendbare Methoden zur Ermittlung des von den Formmaschinen geleisteten Arbeitsanteiles, der ausschließlich zur Verdichtung des Formstoffes im jeweiligen Messpunkt verbraucht wurde. Der Vergleich der Formmaschinen auf der Basis der erreichten Formqualität, deren Reproduzierbarkeit und des zum Erreichen dieser Formqualität von der Formmaschinen verbrauchten Energie- bzw. Kostenaufwandes ist deshalb bei den heutigen Technologien unmöglich.

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, die wesentlichen Erkenntnisse zu den obenerwähnten Problemen der betrieblichen Einschätzung der erreichten Formqualität und des Wirkungsgrades der Formmaschinen darzustellen. Außerdem werden die entsprechende Messtechnik und bestimmte Berechnungsmethoden möglicht universell entwickelt, damit die Formqualität bei jeder hergestellten Form und damit die "formbezogene" sowie "energetische" Qualitätsmerkmale der Formmaschine unabhängig von Ihrer Wirkungsweise und Konstruktion kontinuierlich ermittelt werden können. Die Messtechnik und die Berechnungsmethoden sollen eine Basis zur Entwicklung eines rechnergestützten Systems zur Qualitätskontrolle der Form unter Berücksichtigung des dafür geleisteten Energieaufwandes darstellen. Die Qualitätskontrolle soll durch die Bestimmung der wichtigsten Formeigenschaften mit großer Genauigkeit während der Produktion und deren Vergleich mit Sollwerten bei jeder Form erfolgen und schließt die Bestimmung der Formdichte-, Zugund Druckfestigkeitswerte direkt an der Form ein. Auf diesem Wege ist es möglich, die Wirksamkeit der auf unterschiedlichen Dosierungs- und Verdichtungsmethoden basierenden Formanlagen für bestimmte Formen zu prüfen und zu vergleichen und auf der Grundlage dieser Ergebnisse das optimale Arbeitsfeld für die Maschinen festzulegen, die Konstruktionen zu verbessern und weiter zu entwickeln.

3. Literaturrecherche / Stand der Forschung und Technik

3.1. Methoden zur Bestimmung des Wirkungsgrades von Formmaschinen

Die ersten Untersuchungen an Formmaschinen wurden vermutlich von den Herstellern selbst durchgeführt. Die meisten Ergebnisse dieser Untersuchungen sind nicht veröffentlicht, da kein Interesse für derartige Veröffentlichungen bestand und andererseits die Prüfergebnisse den Konkurrenzfirmen nicht zugänglich gemacht werden sollten.

Rodehüser, A. [2] erkannte die Notwendigkeit, Pressformmaschinen nicht nur nach der Anzahl der fertiggestellten Formen, sondern nach ihrem mechanischen Wirkungsgrad zu beurteilen, um die Wirtschaftlichkeit der Formmaschinen zu erhöhen. Um Werte zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit zu erhalten, brachte der Autor an einer hydraulisch-mechanischen Pressformmaschine einen Indikator an. Aus dem aufgenommenen Druck-Weg-Diagramm wurde die dem Formstoff zugeführte Arbeit wie folgt berechnet:

$$W = A_k \cdot p_{im} \cdot s \text{, [Nm]} \tag{3.1}$$

wobei A_k - Kolbenfläche,

 $p_{\scriptscriptstyle im}$ - mittlere indizierte Luftdruck und

s - Weg des Maschinenkolbens.

Die Differenz, die zwischen der indizierten Arbeit und der dem Formstoff zugeführten Arbeit entsteht, wurde nicht berücksichtigt.

Gesell, W. behandelt in einer Arbeit [3] die Bestimmung des Druckluftverbrauches und des Wirkungsgrades von Pressformmaschinen. Von *Gesell, W.* wird ein Beispiel zur Ermittlung der Reibkraft zwischen Presszylinder und Presskolben angeführt. Ferner werden aufgenommene Indikatordiagramme erläutert. Die indizierte Arbeit einer Pressformmaschine wird wie folgt definiert:

$$W_i = A_k \cdot p_{im} \cdot s \text{, [Nm]}$$
(3.2)

Aus der indizierten Arbeit und der Reibungskraft ergibt sich der "mechanische" Wirkungsgrad zu:

$$\eta_{m} = \frac{W_{i} - W_{R}}{W_{i}} \cdot 100 , [\%]$$
(3.3)

wobei W_R - Reibarbeit.

Der "wirtschaftliche" Wirkungsgrad ist nach Gesell, W. wie folgt definiert:

$$\eta_{w} = \frac{W_{i}}{W_{DL}} \cdot 100, [\%]$$
 (3.4)

wobei W_{DL} - Arbeit der Druckluft.

Die isotherme Arbeit der Druckluft ist dabei nach folgender Beziehung zu berechnen:

$$W_{DL} = p_2 \cdot V_2 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = p_2 \cdot V_2 \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}$$
, [Nm] (3.5)

Der "theoretische" Wirkungsgrad wird nach *Gesell, W.* folgendermaßen definiert:

$$\eta_{th} = \frac{W_{th}}{W_{DL}} \cdot 100 , [\%]$$
(3.6)

Der Arbeitsbetrag W_{th} , "theoretische Nutzarbeit", kann aus den theoretischen Pressdiagrammen bestimmt werden, die nach der Beziehung von Aksjonov, N. P. und Aksjonov, P. N. (3.7) zu konstruieren sind.

~ ~ ~

$$\rho = 1 + C \cdot p^{0,25}$$
, [g/cm³] (3.7)

wobei C - Koeffizient der Verdichtbarkeit;

p – Pressdruck.

Die Wirkungsgrade von Pressformmaschine nach *Gesell, W.* wurden nicht in Abhängigkeit von den sie beeinflussenden Größen bestimmt und ausgewertet, so dass ihre Bedeutung bisher gering blieb.

Eine verbesserte Methode zur Einschätzung des Wirkungsgrades der Formmaschinen wurde von *Schaarschmidt, E* [4] dargelegt. Nach *Schaarschmidt, E.* muss die Arbeit bei der Verdichtung eines Formstoffes, bestehend aus Quarzsand und Binder, zur Überwindung folgender Widerstände aufgewandt werden:

- a) Der Hauptanteil der Verdichtungsarbeit wird für die Überwindung des Widerstandes in den sich berührenden und an den Quarzkörnern haftenden Binderhüllen verwendet. Dieser Widerstand vergrößert sich mit wachsender Verdichtungsarbeit infolge der Zunahme der Dichte. Das bedeutet eine Vergrößerung der Haftflächen des Kornverbandes. Diese Haftung garantiert nach der Verdichtung die Stabilität des Formstoffes. Der Formstoff muss auf Grund der Forderung der Gussstücktechnologie bei Nassgussformen soweit verdichtet werden, dass Formstofffehler – bedingt durch die zu geringe Zug- ,Druck- und Scherfestigkeit – nicht auftreten; diese können entstehen, wenn die Größe der Kontaktflächen des Kornverbandes bei einer bestimmten Haftigkeit des Binders zu gering ist.
- b) Der durch Reibung zwischen den Quarzkörnern entstehende Widerstand soll durch eine weitgehende Umhüllung der Quarzkörner während der Formstoffaufbereitung möglichst gering sein. Eine völlige Umhüllung der Quarzkörner wird nur bei höheren Binderanteilen, die in den Gießereien nicht angewandt werden, beobachtet.
- c) Ein Teil der Verdichtungsarbeit wird bei starker Verdichtung für die Zertrümmerung der Quarzkörner verbraucht. Die Kornzertrümmerung tritt beim Höchstdruckpressen auf, wobei die Quarzkörner bei Drücken über 10 MPa durch Druck- und Scherkräfte zerstört werden (in der Praxis nicht relevant Bem. Aut.).
- d) Der Widerstand beim Herausdrücken des Luftvolumens aus dem Porenraum und dem Verdichten der Luft im Formstoff steigt mit der Bindermenge und der Dichte.

Diese vier verschiedenen inneren Widerstände, für deren Überwindung bestimmte Arbeit geleistet werden muss, können unter dem Begriff "innere Reibung" des Formstoffes zusammengefasst werden [4].

Die Aufgabe einer Formmaschine besteht darin, die für eine bestimmte Form geforderte Formstoffdichte bzw. die zur Herstellung der Form erforderliche Formarbeit W_F zu liefern. Eine Formmaschine kann danach beurteilt werden, mit welchem Wirkungsgrad sie in der Lage ist, die für eine geforderte Formstoffdichte einer Form benötigte Formarbeit abzugeben.

Von *Schaarschmidt, E.* wurde eine Pressformmaschine mit einem pneumatisch - mechanischen Antrieb analysiert. Die dargestellten Ergebnisse gelten für alle Pressformmaschinenkonstruktionen [4].

Gesamtwirkungsgrad der Pressverdichtung wird nach *Schaarschmidt, E* aus dem Verhältnis der Verdichtungs- und Druckluftarbeit bestimmt:

$$\eta_{G} = \frac{W_{V}}{W_{DL}} \cdot 100 = \frac{\eta_{F} \cdot \eta_{i} \cdot \eta_{DL}}{10000}, \qquad (3.8)$$

Vom Autor wurde zum ersten Mal in der Gießereipraxis der wichtige Begriff "Verdichtungsarbeit" eingesetzt. Die Verdichtungsarbeit ist der Arbeitsanteil, der ausschließlich zur Verdichtung des Formstoffes bzw. zur Überwindung der "inneren Reibung", ausgegeben wird. Er wurde als Funktion der Formstoffzusammensetzung und der Packungsdichte von *Schaarschmidt, E.* wie folgt dargestellt (3.9).

$$W_V = m_O \cdot a \cdot e^b \,\rho \, PQ \tag{3.9}$$

wobei mo - Masse des Quarzanteil, kg

 ρ_{PO} - Packungsdichte;

a - Koeffizient,

b – Breite des Formstoffvolumens, mm.

Ein wesentlicher Nachteil dieser Methode zur Bestimmung der Verdichtungsarbeit besteht darin, dass die Formel (3.9) nur für den Testformstoff oder für ähnliche Formstoffe gilt. Außerdem fordert die Bestimmung der zur Berechnung der Verdichtungsarbeit benötigten Größen einen erheblichen Arbeitsund Zeitaufwand. Die Bestimmung der Formqualität beschränkt sich bei dieser Methode in der Bestimmung der mittleren Packungsdichte der Sandkörner im Formquerschnitt. In der Praxis ist aber wesentlich wichtiger, die Formdichte in der so genannten "Arbeitszone", also in dem mit der Schmelze kontaktierenden Formanteil zu kennen. In dieser Methode ist dies nicht vorgesehen. Die anderen vom Autor ermittelten Wirkungsgrade der Pressformmaschinen spiegeln die Qualität der Formmaschinen bezogen auf ihre Konstruktion wieder.

Wirkungsgrad der Formmaschine:

$$\eta_F = \frac{W_F}{W_{DL}} \cdot 100 , \,\%$$
 (3.10)

Der Wirkungsgrad der Pressformmaschine gibt die Effektivität der Maschinenarbeit beim Pressen an. Die Formarbeit W_F besteht aus der Verdichtungsarbeit und der Reibarbeit zwischen dem Formkasten und dem Presskolben.

Mechanischer Wirkungsgrad:

$$\eta_i = \frac{W_F}{W_i} \cdot 100 , \% \tag{3.11}$$

Dieser Wirkungsgrad liefert eine Aussage über die Qualität der Maschinenkonstruktion im Bezug auf die Reibkraft im Presszylinder und die Masse des Presskolbens mit Auflast. Zwischen der indizierten Arbeit W_i und der Formarbeit W_F besteht ein Unterschied, der durch Reibarbeit zwischen Presskolben und Zylinder, Arbeit für die elastische Verdichtung des Formstoffes und die elastische Dehnung der Formmaschinenkonstruktion sowie die Hubarbeit für den Presskolben einschließlich Abhebmechanismus, Modellwerkzeuge, Formkasten, Formstoff und Füllrahmen zu erklären ist.

Druckluftnutzungsgrad (Gütegrad):

$$\eta_{DL} = \frac{W_i}{W_{DL}} \cdot 100 \tag{3.12}$$

Dieser Wirkungsgrad spiegelt die Ausnutzung der Druckluftenergie in der Maschine wider.

In seiner Arbeit untersuchte *Schaarschmidt, E.* verschiedene technologische Probleme der Formstoffverdichtung auf Press- und Rüttelformmaschinen sowie die Wirkung der Verdichtungseigenschaften des Formstoffes, des Pressdruckes, der Pressgeschwindigkeit, der Formkastengeometrie und der Formstoffmenge auf den Wirkungsgrad der Formmaschine. Diese Fragen wurden außerdem von den anderen Autoren behandelt.

Aus den dargestellten Arbeiten geht deutlich hervor, dass die Formmaschinen oft als mechanische Aggregate betrachtet wurden, ohne dass die Qualität des Endproduktes (der Form) bei gegebener Formkasten- und Modellgeometrie sowie bei geeigneter Formstoffbeschaffenheit unter Berücksichtigung des bei der Produktion geleisteten Energieaufwandes als das Kriterium des Formmaschinenqualität betrachtet wurde. Dieses Kennzeichen ist aber in der Praxis wesentlich wichtiger als der "mechanische" Wirkungsgrad. Außerdem sind die zahlreichen Arbeiten für die Verdichtungsweise Pressen durchgeführt. Für moderne Methoden wie Impuls- oder Luftstrompressen wurden solche Untersuchungen nicht vorgenommen.

3.2. Methoden zur Qualitätskontrolle der Form

3.2.1. Laboruntersuchungen

Zur Kennzeichnung der Formqualität werden in der Praxis Prüfmerkmale der Formfestigkeit und Formdichte benutzt, die sowohl an Prüfkörpern als auch direkt an der Form gemessen werden können. Die Grünfestigkeit gewährleistet den Zusammenhalt des Formstoffes beim Modellziehen und den nachfolgenden Manipulationen (Form wenden, Transport, Kerneinlegen, Zusammenbau). Beim anschließenden Gießen sichert die Grünfestigkeit in der ersten Phase auch den notwendigen Widerstand gegen das einströmende Metall und ermöglicht so die Gusskörperbildung. Im weiteren Verlauf werden zusätzlich die Hochtemperatureigenschaften des Formstoffes wirksam [1].

Die Grünfestigkeitseigenschaften werden grundsätzlich an den zylindrischen Normprüfkörpern ermittelt. Dazu wird dieser Prüfkörper vereinbarungsgemäß [5], [6] mit einer Verdichtungsarbeit von 3,26 Nm (entspricht 3 Normrammschlägen) verdichtet. Anstelle der Verdichtung mit dem international üblichen Rammgerät kann für weitere Untersuchungen die Prüfkörperherstellung durch Pressen oder andere Verdichtungsprinzipien erfolgen [1].

Bei den Formmanipulationen treten bevorzugt Zugbeanspruchungen auf. Die Druckbeanspruchungen dominieren meist beim Kerneinlegen, dem Zusammenbau oder der Formfüllung. Aus diesem Grunde ist es üblich, die Grün-



Bild 3-1: Bestimmung der Grünfestigkeiten:

- 1) Gründruckfestigkeit;
- 2) Grünscherfestigkeit;
- 3) Grünzugfestigkeit;
- 4) Grünspaltfestigkeit.





Festigkeitsverhalten

- a) Druckfestigkeit;
- b) Zugfestigkeit.

1 Wassergehalt 2,4%; 2 Wassergehalt 2,8%; 3 Wassergehalt 3,2%; 4 Wassergehalt 4,4%.

zug- und Gründruckfestigkeit zu bestimmen und als Qualitätskennzeichen der Form bezüglich der Formfestigkeit zu verwenden.

Im Bild 3-1 sind die Bestimmungsmethoden für die wichtigsten Grünfestigkeitskennwerte dargestellt. Während zwischen der Gründruck- und der Scherfestigkeit ein relativ enger Zusammenhang besteht und daher eine Bestimmung beider Kenngrößen im Rahmen der Formstoffprüfung wenig sinnvoll ist, reagiert die Grünzugfestigkeit im Hinblick auf die Wirkung bestimmter Einflussfaktoren anders. Aus diesem Grund empfiehlt sich die Bestimmung dieser Kenngröße besonders bei hohen Formstoffverdichtungen und zur Überwachung von Kreislaufformstoffen. Das Bild 3-2 zeigt die Änderung der Festigkeitseigenschaften bei steigender Verdichtung. Die Grünzugfestigkeit übt besonders beim Trennen von Modell und Form einen großen Einfluss auf die erreichbare Formqualität aus. Die hier dargestellten Prüfmethoden für die Grünfestigkeitseigenschaften werden ausschließlich an speziellen Prüfkörpern im Labor gewonnen. Eine Übertragbarkeit auf die praktischen Verhältnisse in einer verdichteten Form ist nur bedingt möglich. Sie setzt zumindest eine weitgehende Anpassung der Laborverdichtung im Hinblick auf Verdichtungsart und Verdichtungsintensität an die praktischen Verdichtungsbedingungen der Formmaschine voraus. Aus diesem Grund kommt der direkten Bestimmung der Formqualität eine besondere Bedeutung zu [1].

3.2.2. Verfahren zur betrieblichen Qualitätskontrolle der Formen

Die Formhärte- und Formfestigkeitsprüfung sind die am meisten verbreiteten Verfahren zur Einschätzung der Formqualität unter Betriebsbedingungen. Die beiden Messungen erfolgen manuell direkt an der Form. Bei der herkömmlichen Formhärtemessung dient die Eindrucktiefe einer federbelasteten Kugel auf einer gegenläufig eingeteilten Skala als Härtewert. Die Empfindlichkeit dieses Messprinzips reicht bei den heute üblichen Verdichtungsgraden nicht aus. Deshalb wurde eine Methode ähnlich der Härteprüfung im Brinellversuch vorgeschlagen und entsprechende Messgeräte entwickelt [7]. Wesentlich besser für die Einschätzung der Formfestigkeit ist die Formfestigkeitsprüfung. Die entsprechenden Geräte geben direkt die Druckfestigkeit des Formstoffes an. Die damit an Formen und Prüfkörpern bestimmbare Druckfestigkeit entspricht mit hinreichender Genauigkeit der am Prüfkörper direkt bestimmten Festigkeit. Beide stehen in einem linearen Verhältnis zueinander. Für die Bestimmung der Zugfestigkeit (die in der Praxis wesentlich wichtiger als die Druckfestigkeitsmessung ist) sind beide Methoden ungeeignet, da die Kurvenverläufe in höheren Verdichtungsbereiche sehr unterschiedlich sind. Die Formhärte- sowie Formfestigkeitsmesswerte können auch dazu dienen, indirekt den Verdichtungsgrad der betriebsmäßig hergestellten Gussformen zu ermitteln. Eine weitere Methode wurde von *Egen, W.* und anderen für die Verdichtungsmethoden Rütteln und Pressen erarbeitet [8]. In der Praxis werden, wegen der Schwierigkeiten an jeder Form die Handprobe durchzuführen, beide Messungen oft vernachlässigt, was die häufige Ursache von Gussausschuss ist. Zur Zeit existieren keine entsprechende Messtechnik und rechnergestützte Verfahren zur Ermittlung der Formfestigkeitseigenschaften direkt an der Form während ihrer Fertigung.

Die Grünzugfestigkeit kann ebenfalls direkt an der Form ermittelt werden. Die dafür geeigneten Geräte werden von der Firma Georg Fischer DISA AG produziert. Die wesentlichen Nachteile einer solchen Prüfung sind die Durchführung von Hand und Beschädigung einer erheblichen Formoberfläche.

Ein Mikroprozessorsystem zur Kontrolle der Unversehrtheit von Formen wurde von *Porochnja, V. M.,* u. a. vorgeschlagen. Das Grundprinzip dieses Prüfverfahrens besteht darin, dass eine neu hergestellte Form mit einer Musterform hinsichtlich Unversehrtheit verglichen wird. Dieses Prüfverfahren beschränkt sich auf die Prüfung nur sichtbarer Fehler bei der Formherstellung. Da die möglichen Abweichungen der Formdichte und Formfestigkeit von den zulässigen Toleranzen bei der Prüfung im Grunde nicht bestimmt und berücksichtigt werden können, gibt dieses Verfahren kein vollständiges Bild über die Formqualität an und kann deshalb zur Steuerung und Automatisierung der Formmaschinen nur als ein zusätzliches Prüfverfahren empfohlen werden.

Carrey, P. R., u. a. [9] haben im Jahr 1992 den Formqualitätsindikator MQI (Mould Quality Indikator) mit einem Prüfgerät entwickelt und getestet, wel-

ches direkt an der Form, also on-line, Messergebnisse liefert. Zur Überprüfung des Gerätes wurden an Cold-Box- und fuhranharzgebundenen Formen Werte für Verdichtung, Festigkeit, Gussoberflächengüte, Penetration und Blattrippenbildung ermittelt und mit MQI Messergebnissen verglichen. Ermittelt wurde ein eindeutiger Zusammenhang zwischen diesen Messwerten und denen des genannten Tests. Ein ähnliches Gerät wurde von *Dietert, H.* entwickelt. Die Formdichtemessung erfolgt auf der Basis des Widerstandes gegen den Druckluftdurchfluss. Mit Hilfe der MQI-Zahl wird die Oberflächengüte der Form eingeschätzt. Man ist überzeugt, dass die MQI-Zahl zur Bewertung der Formqualität geeigneter ist, als die Prüfung auf Verdichtbarkeit, Wassergehalt und Tongehalt. Es gibt die Angaben in der Literatur, dass die Versuche, diese Methode zur Qualitätseinschätzung der Formen aus tongebundenen Formstoffen einzusetzen, ziemlich erfolgreich waren [10].

Aus der Analyse der gegenwärtig vorhandenen Methoden zu Qualitätskontrolle der Formen geht deutlich hervor, dass keine der beschriebenen Methoden ein vollständiges Bild der Formqualität hinsichtlich der Formdichte und Formfestigkeit gibt. Außerdem ist keines der dargestellten Verfahren zur kontinuierlichen Bestimmung der Formqualität in einem rechnergestützten Qualitätsprüfsystem geeignet.

3.3. Dichteberechnung und Messungen der Beanspruchungen im Formstoff

Die Formherstellung ist ein komplexer Verdichtungsvorgang, der von vielen Faktoren beeinflusst wird. Bei der Auswahl und Einstellung der technischen Parameter für die maschinelle Umsetzung dieser Arbeitsoperationen wird häufig rein empirisch vorgegangen, da die wissenschaftliche Durchdringung dieser Vorgänge noch unzureichend ist. Es fehlen geeignete Messmethoden und ausreichend empfindliche Messtechnik zur betrieblichen Bestimmung von Formeigenschaften nicht nur nach dem, sondern während des Verdichtens, um den Verdichtungsvorgang überwachen und steuern zu können. Da die direkte Messung der Formdichte und Formfestigkeit während des Verdichtens im Prinzip unmöglich ist, wurde versucht, diese Formeigenschaften durch die Messung der Verdichtungskräfte bzw. Beanspruchungen im Formstoff zu beurteilen. Die Formstoffdichte hängt vor allem von den Druckspannungen, unter deren Wirkung ein bestimmtes Volumen verdichtet wurde, von der Dauer der Verdichtung (sehr wichtig für dynamische Prozesse) und von der Formstoffzusammensetzung ab. Mit einem Verdichtungsverfahren Pressen haben sich zahlreiche Wissenschaftler beschäftigt, um die Abhängigkeiten zwischen dem Pressdruck und der entsprechenden Formdichte zu bestimmen. Manche von diesen Abhängigkeiten haben sehr gute Übereinstimmung mit den praktischen Ergebnissen gebracht. Die wesentlichen Nachteile dieser Umrechnungsmethoden bestehen immer darin, dass deren Geltungsbereich auf die unterschiedlichen technisch-technologischen Bedingungen beschränkt ist. Außerdem kann durch diese Abhängigkeiten nur die mittlere Dichte der Form ermittelt werden. In der Praxis ist die Dichte der Form ungleichmäßig über die Höhe und den Querschnitt der Form verteilt. Die Ungleichmäßigkeit der Formstoffverdichtung ist die Ursache für eine Vielzahl von Fehlererscheinungen und kann zu deutlichen Beeinflussungen der Gussstückqualität (Maßgenauigkeit, örtliches Treiben, Penetration) führen. Das Problem kann dadurch gelöst werden, dass die Formstoffdichte in den Formpartien, in denen die Formstoffverdichtung am niedrigsten ist, kontinuierlich kontrolliert wird. Weil das Pressen eine relativ langsame Verdichtungsmethode ist, spielt die Plastizität des Formstoffes keine Rolle für den Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Formstoffdichte. Für ein elementares Volumen ergibt sich nach Orlov, G. [11] folgende Abhängigkeit:

$$\rho_1 = \rho_{\max} \left(\sigma_1 / \sigma_{\max} \right)^{\mu}, \qquad (3.13)$$

Als maximale Dichte ρ_{max} wird üblicherweise die Formstoffdichte bei einem Druck von σ_{max} = 10 MPa bezeichnet. Der Verdichtungskoeffizient μ wird experimentell ermittelt. Er ist für einen bestimmten Formstoff konstant.

Zur Bestimmung der Sanddichte bei der dynamischen Verdichtung wird von *Orlov, G.* [11] die Formel (3.14) vorgelegt.

$$\rho_{1} = \rho_{\max} \left(\frac{\sigma_{1}}{\sigma_{\max}} \right)^{\mu} \left\{ 1 + \left[\frac{\sigma_{1}}{\sigma_{\max}} \left(\frac{\rho_{\max}}{\rho_{0}} \right)^{4} - 1 \right] \exp \left(-\frac{\sigma \Delta t}{\mu \lambda} \right) \right\}^{-\mu}$$
(3.14)

Die Koeffizienten μ , A und λ werden experimentell bestimmt. Von *Orlov, G* [12] wurde auch die Korrelation: Formhärte – Formdichte beschrieben, so dass die Formhärte als Funktion der Beanspruchungen dargestellt wird:

$$FH = f(\sigma_1) \tag{3.15}$$

Aus diesen Abhängigkeiten folgt, dass durch die Messung der Beanspruchung im Formstoff während der Verdichtung unter Berücksichtigung seiner Eigenschaften die Formdichte und Formhärte bestimmt werden können. Dafür sollen die Verdichtungskräfte im Messpunkt oder in Messpunkten kontinuierlich während der Verdichtung erfasst werden. Die ersten Versuche dazu wurden von *Tilch, W.* noch im Jahr 1970 [13] veröffentlicht. Die Bewegung des Formstoffes konnte bei diesen Versuchen nicht berücksichtigt werden.

Später wurden von *Boenisch, D.* [14] die im Bild 3-3 gezeigten Druckmessdosen entwickelt. Sie enthalten kleine Metallkolben, in denen jeweils eine Kugel eingelassen ist. Plättchen aus Weichblei werden in die Messdose eingelegt und mit dem Kolben verschlossen. Die Druckmessdose wird an die gewünschte Messstelle des Modells oder des Modellträgers gelegt. Die Kugel hinterlässt im Bleiplättchen einen dem Wirkdruck entsprechenden Eindruck. Die Kugel wird dabei um dem Abdruck entsprechenden Beitrag verschoben, was als erster Versuch zur Berücksichtigung der Sandbewegung während der Verdichtung bezeichnet werden kann. Die Versuche, diese Druckmessdosen zur kontinuierlichen Druckerfassung einzusetzen, waren aber erfolglos. Statt eines Bleiplättchens wurde eine Kraftmessdose eingebaut. Die Ergebnisse sind in den Bilder 3-4 und 3-5 dargestellt.

Da bei der Erfassung die Sandbewegung nicht mehr berücksichtigt werden konnte, zeigen die Druckmessdosen lediglich den durch den Sand übertragenen Pressdruck, d. h. die Sensoren widerspiegeln den Vertikal- und Seitendruck im Formstoff. Nach der Presseentlastung gehen die Sensorenanzeigen auf null zurück. Die Formstoffdichte unter Berücksichtigung der Rückfederung des Formstoffs kann nicht berechnet werden. Deswegen sind diese Druckmessdosen zur Echtzeitqualitätskontrolle der Form sowie zum Einsatz im Steuerungssystem ungeeignet. Außerdem muss für die kontinuierliche



Bild 3-3: Von Boenisch, D. [14] entwickelte Druckmessdosen zur Messung der Verdichtungskräften in tongebundenen Formen



Bild 3-4: Drucksteigerung an der Pressplatte während der Verdichtung



Bild 3-5: Druckveränderung im Formstoff während der Verdichtung

Bestimmung der Formeigenschaften die Wirkung der vertikalen und seitlichen Spannungen nicht getrennt sondern gemeinsam berücksichtigt werden. Die Anwendung der vorgestellten Druckmessdosen kann diese Anforderung nicht erfüllen.

3.4. Konsequenzen

Zur Echtzeiterfassung der Verdichtungskräfte in den Grünsandformen soll zunächst eine entsprechende Messtechnik entwickelt werden. Bei der Erarbeitung einer Konstruktion für die neuen Sensoren muss beachtet werden, dass für diese Messungen der allseitige Druck berücksichtigt werden muss. Diese Anforderung muss der Sensorfühler erfüllen. Die Abhängigkeit für die Druckbestimmung ergibt sich in diesem Fall wie folgt:

$$\sigma_1 = F_i / S_f;$$

(3.16)

Die Sensoren sollen in den Modellträger oder in das Modell so montiert werden können, dass keine Beschädigung oder Änderung der Formoberfläche stattfindet. Die Auswahl der Punkte zur Sensorinstallation erfolgt durch die Analyse der erforderlichen Dichteverteilung in der Form. Es müssen die Punkte an der Form bestimmt werden, in denen die Formdichte und Formfestigkeit am niedrigsten sind. Normalerweise ist es für die Qualitätskontrolle ausreichend, die Formeigenschaften in einem solchen Punkt zu kontrollieren, da in anderen Formpartien die Formfestigkeit sowie die Formdichte automatisch größer werden. Durch eine kontinuierliche Datenerfassung der Veränderung des Sanddruckes σ_1 mit Hilfe des Datenerfassungs- und Bearbeitungsprogramm können die absoluten Werte der Formstoffdichte und Formhärte sowohl während als auch nach dem Verdichten (Rückfederung) in Echtzeit ermittelt werden.

Um eine ganzheitliche Einschätzung der Form zu gewährleisten, sollen ihre Druck- und Zugfestigkeit bestimmt werden. Es existieren bis zur Gegenwart keine Methoden zur kontinuierlichen Bestimmung dieser wichtigsten Formeigenschaften. Deshalb ist es das Ziel der vorliegenden Arbeit, eine Methodik zur Bestimmung der Druck- und Zugfestigkeit durch die nach dem Verdichten gemessene Formstoffdichte (oder durch die erreichten Beanspruchungen im Messpunkt) unter Berücksichtigung der Formstoffzusammensetzung zu erarbeiten. Die nach dem Verdichten gewonnenen Formdichte sowie –festigkeitswerte werden mit Sollwerten verglichen. Daraus resultiert das "formbezogenes" Qualitätskennzeichen der Formmaschine.

Außerdem soll eine Methode zur Bestimmung des "energetischen" Qualitätskennzeichens erarbeitet werden. Dann können unterschiedliche Formmaschinenkonstruktionen verglichen, die Einstellung der Formanlage auf ein bestimmtes Produktionssortiment vereinfacht und die Formqualität für jede hergestellte Form kontinuierlich bestimmt werden.

4. Erarbeitung der Messtechnik zur kontinuierlichen Bestimmung der Formeigenschaften

4.1. Entwicklung der Sensoren

Wie oben erwähnt wurde, besteht die Aufgabe des Sensors darin, die allseitige Sandbeanspruchung im Messpunkt während der Verdichtung unter Berücksichtigung der Sandbewegung zu erfassen. Außerdem soll der Sensor in der Lage sein, den Endzustand der Form im Messpunkt nach dem Entlasten des Sandes anzuzeigen. Nach der Analyse der in den Bilder 3-3, 3-4 und 3-5 dargestellten Druckmessdosen und bei den rechnergestützten Messungen bestehenden Problemen wurde die im Bild 4-1 dargestellte Konstruktion des Sensors entwickelt. Der Sensor besteht im wesentlichen aus einem kugelförmigen Fühler 1, einem Gehäuse 2, einer Feder 3 und einer auf dem Basisteil 9 liegenden Kraftmessdose 7. Der Sensorfühler 1 ist beweglich. Die Feder 3 ist zwischen dem Sensorfühler 1 und dem Druckteil 6 angeordnet. Das Druckteil 6 ist an einer Kraftmessdose 7 anliegend montiert. Die Bewegung des Fühlers 1, der Feder 3, des Druckteiles 6 und der Kraftmessdose 7 zueinander ist in horizontaler Richtung ausgeschlossen. Der obere Teil des Sensors besteht aus einem Fühler 1 und einem Gehäuse 2. Das Gehäuse 2 weist innen und außen Gewinde auf. Der untere Teil ist aus dem Gehäuse 8 mit dem Basisteil 9, der Konterschraube 10, dem Zwischenteil 4 und der Kontermutter 5 ausgebildet.

Die Kraftmessdose 7 wird mit dem Basisteil 9 an das untere Gehäuse 8 angeschraubt und mittels festgeschraubter Konterschraube 10 fixiert. Auf die Kraftmessdose wird koaxial der Druckteil 6 gelegt. Dann wird das Zwischenteil 4 angeschraubt und die Feder 3 angelegt. Von oben wird der obere Teil angeschraubt und mit der Kontermutter 5 befestigt. Bei der Sensoreinstellung auf eine bestimmte Anfangskraft muss das Gehäuse 2 entsprechend angeschraubt werden. Eine Kontrolle des Abstandes zwischen dem oberen Ende des Gehäuse 2 und dem unteren Ende der Konterschraube 10 ermöglicht die genaue Krafteinstellung. Damit ist der Sensor einsatzbereit.





Bild 4-1: Die für die Messung der von der Sandbewegung hervorgerufenen Kraft entwickelte Kraftmessdose

Der Sensor kann in den Modellträger oder in das Modell so einmontiert werden, dass keine Beschädigung oder Änderung der Formoberfläche stattfindet. Die Auswahl der Punkte zur Sensorinstallation erfolgt durch eine Analyse der erforderlichen Dichteverteilung in der Form. Es müssen die Punkte an der Form bestimmt werden, in denen die Formdichte und Formfestigkeit am niedrigsten sind. Normalerweise ist es für die Qualitätskontrolle ausreichend, die Formeigenschaften in einem solchen Punkt zu kontrollieren, da sich in anderen Formpartien höhere Formfestigkeits- und Formdichtewerte einstellen. Der Sensor ist so konstruiert, dass die Störanfälligkeit des Sensors auf ein Minimum reduziert wird.

Zum messtechnischen Aufbau des Mess- und Steuerungssystems sollen elektrische Messgeräte, Messverstärker und Registriergeräte eingesetzt werden. Der Auswahl der erforderlichen elektrischen Einrichtungen erfolgt in Abhängigkeit von der technisch-technologischen Bedingungen und der Konstruktion der Formanlage.

Der Sensorfühler 1 hat eine kugelförmige Form mit einem Durchmesser von 6 mm und dringt bei der Messung in den Sand ein. Während der Verdichtung wird der Formstoff infolge der Verdichtungswirkung der Formanlage in Bewegung gesetzt. Dabei entstehen im Formstoff entsprechende Verdichtungskräfte bzw. Beanspruchungen, die von der Formstoffzusammensetzung, Verdichtungsintensität und weiteren technisch-technologischen Parameter der Formherstellung bestimmt werden. Durch die Wirkung der Verdichtungskraft wird der Sensorfühler entsprechend der Sandbewegung in das Gehäuse 2 geschoben. Die Bewegung des Sandes ist dabei ausschlaggebend. Wird der Sand nicht mehr bewegt (der Formstoff wird im Messpunkt nicht mehr verdichtet), so kann der Sensorfühler auch nicht mehr in Bewegung gesetzt werden. Dadurch wird nur die von der Sandbewegung hervorgerufene Kraft aufgenommen. Das unterscheidet den neu entwickelten Sensor von den üblichen Kraft- bzw. Druckmessdosen. Die Form der Fühlerspitze gewährleistet die Aufnahme der allseitigen Verdichtungskräfte. Um diese Kräfte bzw. Beanspruchungen erfassen zu können, wurden in den Sensor eine Feder 3 und eine Kraftmessdose 7 eingebaut. Durch die Bewegung des Sensorfühlers wird die Feder 3 zusammengedrückt und gibt die Kraftveränderung an die Kraftmessdose 7 weiter. Die Bewegung des Fühlers um 1 mm erzeugt dabei die Kraftveränderung von 0,855 N. Der Sensor ist so konstruiert, dass die Einstellung auf eine bestimmte Anfangskraft von 0 bis 4,275 N möglich ist. Nach dem Entlasten des Formstoffes wird die Fühlerposition sowohl vom erreichten Verdichtungszustand der Form als auch von der dem Verdichtungszustand und der Formstoffzusammensetzung entsprechenden Festigkeit bestimmt.

4.2. Versuche zur Bestimmung der Funktionstüchtigkeit des Sensors

Ziel der Untersuchungen war es, die Funktionstüchtigkeit des Sensors zur Erfassung der von der Sandbewegung entstehenden Kräften nachzuweisen.

4.2.1. Versuchsaufbau und -durchführung

Zur Bestimmung der Funktionstüchtigkeit und Genauigkeit des neu entwickelten Sensors wurde die im Bild 4-2 dargestellte Einrichtung verwendet. Die Versuche wurden an einer Pressmaschine zur Herstellung von Prüfkörpern durchgeführt. Der Sensor 2 wurde auf eine Vorspannkraft von 1,0 N eingestellt und in das aus den Teilen 3 und 4 bestehende Gehäuse installiert. Die bei den Versuchen verwendete Prüfkörperhülse 1 stellt eine in der Gießereipraxis übliche Einrichtung zur Prüfung der Verdichtbarkeit dar. Für den Vergleich der Sensoranzeigen und der durch den Formstoff übertragenen Kraft wurde die Kraftmessdose 5 verwendet. Im Bild 4-3 wird der messtechnische Aufbau der Versuchsanlage, bestehend aus der im Bild 4-2 gezeigten Versuchseinrichtung 2, MGC 3, Messpanel DataSchuttle Express von SYNOTECH Sensor und Messtechnik GmbH 4 und Rechner 5, dargestellt. Bei den Untersuchungen wurden vier Formstoffe bestehend aus den Komponenten Quarzsand, Bentonit und Wasser, unterschiedlicher Zusammensetzung verwendet. Zur Aufbereitung des Formstoffes diente der Mischer LM-15.



	Beschreibung
1	Hülse
2	Sensor
3	Oberteil
4	Unterteil
5	Kraftmessdose

Bild 4-2: Versuchseinrichtung



Bild 4-3: Messtechnischer Aufbau der Versuchsanlage

Die Zusammensetzungen der Formstoffe sowie die entsprechenden Verdichtbarkeitwerte sind in der Tabelle 4-1 zusammengefasst.

	Quarzsand	Bentonitge-	Wassergehalt,	Verdichtbar-
	H32, %	halt, %	%	keit, %
Formstoff 1	91	9	1,8	29,1±0,09
Formstoff 2	93	7	1,8	41,7±0,19
Formstoff 3	91	9	2,1	42,5±0,12
Formstoff 4	93	7	2,1	55,7±0,31

Tabelle 4-1: Zusammensetzungen der Formstoffen

Nach dem Mischen wurde der Formstoff sorgfältig gesiebt und während der Versuche in einem hermetisch verschlossenen Behälter aufbewahrt. Der Formstoff wurde bei den Versuchen in die Prüfhülse dosiert und dann mit dem Presskolben 1 (Bild 4-3) bei einem konstanten Pressdruck von 1 MPa (Verdichtbarkeitsprüfung) verdichtet. Die Formstoffdosierung erfolgte sowohl mit einer konstanten Masse von 150 g als auch mit einem konstanten Volumen entsprechend der Hülsenhöhe. Für jede Art der Dosierung wurden sieben Versuche durchgeführt. Die von den getesteten Sensoren ausgegebenen Signale wurden mit Hilfe des MGC erfasst (Data Acquisition), in Übereinstimmung mit der Sensorenkonstruktion bearbeitet (Signal Conditioning) und an das Panel 4 weitergeleitet. Das Messpanel dient als Übertragungsgerät zwischen MGC und Rechner und verändert das vom MGC ausgegebene Signal nicht. Die Spannungssignale wurden gemessen, kontinuierlich in entsprechende physische Werte umgerechnet und im Rechner gespeichert.

4.2.2. Diskussion der Versuchsergebnisse

• Vergleich der Sensor- und Kraftmessdosenanzeigen

Im Bild 4-4 sind Datenerfassungsergebnisse für die Verdichtungsmethode Pressen dargestellt. Der dargestellte Versuch erfolgte mit dem Formstoff 2 und der Dosierung mit einer konstanten Masse. Da die dargestellten Kurven den Kurven für andere Formstoffe und für die Formstoffdosierung mit dem konstanten Volumen ähnlich sind, werden an dieser Stelle die anderen Versuchsergebnisse nicht betrachtet. Der Verdichtungsvorgang kann in vier Phasen unterteilt werden, was durch die Konstruktion der Versuchsanlage und die Versuchsweise zu erklären ist. Die erste Phase der Verdichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass sie ohne erkennbaren Widerstand abläuft. Die zweite Phase ist sehr kurz und stellt die in der Gießereipraxis übliche Geschwindigkeit der Drucksteigerung dar. Konstruktionsgemäß war es unmöglich, den Formstoff mit einem solchen Verdichtungsregime zu verdichten und dabei den Enddruck exakt zu erreichen. Deshalb wurde die Presse auf eine niedrigere Geschwindigkeit umgeschaltet. Diese Verdichtungsphase wird im Bereich drei gezeigt. Der vierte Bereich zeigt den Verdichtungsvorgang, bei dem die Pressgeschwindigkeit manuell reguliert wurde, damit die Endkraft bzw. der -druck möglichst genau eingestellt werden konnten. Danach wurde die Presse auf Null entlastet. Eine bestimmte Ungenauigkeit der Verdichtungsregime konnte bei den Untersuchungen infolge der gewählten Versuchsweise nicht ausgeschaltet werden.

Aus Bild 4-4 geht deutlich hervor, dass die Sensoranzeige und die mit der Kraftmessdose 5 aufgenommenen Daten wegen ihrer Größenunterschiede nicht vergleichbar sind. Der Kurvenverlauf kann jedoch verglichen werden. Die aus den mit der Kraftmessdose 5 aufgenommenen Daten resultierende Kurve zeigt die Ergebnisse, die typisch für eine herkömmliche Kraftmessung beim Pressen sind. Sie ähnelt den im Bild 3-4 dargestellten Ergebnissen. Der Verlauf der Sensoranzeige unterscheidet sich vom Kraftkurvenverlauf vor allem dadurch, dass die Schwankungen der Verdichtungskraft besonders im Bereich IV keine Auswirkung auf die Sensoranzeige haben, da sich der Formstoff im Messpunkt nicht bewegt hat. Außerdem weist der Kurvenverlauf der Abhängigkeit zwischen den Sensoranzeigen und der Kraft eine Ähnlichkeit zum Kurvenverlauf der Abhängigkeit zwischen Dichte und Pressdruck auf (Bild 4-6 a). Nach der Verdichtung geht die Sensoranzeige nicht auf Null zurück, sondern weist einen Knick auf. Damit kann sie vermutlich zur Bestimmung des Endzustandes der Form unter Berücksichtigung der Rückfederung genutzt werden. Im Vergleich zu den Kraftmessdosenkurve sind die aus Kraftanzeigen ermittelten Drucke gut vergleichbar.



Bild 4-6: a) Abhängigkeit zwischen der von der Kraftmessdose und vom Sensor aufgenommenen Werten;

 b) Abhängigkeit zwischen dem Pressdruck und dem auf der Basis der Sensoranzeige umgerechneten Druck.

Der durch den Sand übertragene Pressdruck wird nach der Formel (4.1) berechnet.

$$P_k = \frac{F_k}{A}, \text{ MPa}$$
(4.1)

wobei *F*^{*k*} - mit der Kraftmessdose gemessene Kraft, N;

 $A - Fläche, mm^2$.

Der Druck, der von der Sensoranzeige ermittelt wurde, ergibt sich aus der Gleichung (4.2).

$$P_s = \frac{F_g}{A_F}$$
, MPa (4.2)

wobei F_g - mit dem Sensor gemessene gesamte Kraft, N;

 A_F - Fläche des im Formstoff abgeformten Fühlersteiles, mm².

Die Fläche A_F wird nach Formel (4.3) durch die Sensoranzeige wie folgt berechnet:

$$A_F = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot (r - w_f), \, \mathsf{mm}^2 \tag{4.3}$$

wobei r - Radius des Fühlers, mm;

 W_{f} - durch die Sensoranzeige berechneter Fühlerweg, mm.

Alle Drücke weisen bei den Kurvenverlauf Unterschiede auf, die für die Kraftkurven typisch sind. Im Bereich II ist die Abhängigkeit zwischen beiden Werten linear (Bild 4-6 b), wodurch eine unkomplizierte Ermittlung des mit den konventionellen Methoden gemessenen Druckes auf der Basis der Sensoranzeige für einen konstanten Formstoff möglich wird.

Der Unterschied zwischen dem herkömmlichen Druck- oder Kraftmessdosen und dem neu entwickelten Sensor besteht im wesentlichen darin, dass mit dem neuen Sensor vor allem die Kraft ermittelt wird, die von der Sandbewegung zur Veränderung des in den Formstoff hineinragenden Fühlervolumens benötigt wurde. Diese Kraft unterscheidet sich sehr stark von den mit den konventionellen Methoden ermittelten Kräften sowohl in ihrer Größe als auch in den Kurvenformen (Bild 4-4). Das gilt auch für die aus diesen Kräften umgerechneten Drücke bzw. im Sand auftretenden Beanspruchungen (Bild 4-5). Deshalb sind die obenerwähnten Methoden zur Berechnung der Formstoffdichte durch die bei der Verdichtung des Formstoffes entstehenden Beanspruchungen bei Anwendung der neu entwickelten Sensoren nicht anwendbar und müssen neu erarbeitet werden. Außerdem kann auf der Basis der Sensoranzeige die Verdichtungsarbeit des Formstoffs berechnet und mit der Verdichtungsarbeit der Formmaschine verglichen werden.

• Auswirkung der veränderlichen Verdichtbarkeit auf die Sensoranzeigen

Die den Formstoffzusammensetzungen entsprechenden Verdichtbarkeitwerte (Tabelle 4-1) werden im Bild 4-7 gezeigt. Im Bild 4-9 sind die Messergebnisse für die Formstoffe 1 bis 4 sowohl bei der Dosierung mit konstanter Formstoffmasse von 150 g als auch bei der Dosierung mit konstantem Volumen und bei der Verdichtung mit einem konstanten Pressdruck von 1 MPa dargestellt.

Aus diesen Bildern geht deutlich hervor, dass die Sensoranzeigen am Ende der Verdichtung nicht nur von der erreichten Enddichte, sondern auch von der Verdichtbarkeit des Formstoffes abhängen. Trotz der unterschiedlichen Zusammensetzungen besaßen die Formstoffe 2 und 3 fast gleiche Verdichtbarkeit. Die Sensoranzeigen am Ende der Verdichtung unterscheiden sich auch nur wenig voneinander (Bild 4-9). Der Unterschied zwischen den Erwartungswerten der Sensoranzeige für diese Formstoffe beträgt 0,099 N und überschreitet nur wenig das Streuungsintervall für die einzelne Messung. Dieser Fakt wird durch den kleinen Unterschied zwischen Enddichte- und Verdichtbarkeitwerte für diese Formstoffe erklärt (Bilder 4-7 und 4-8). Man sieht, dass sich die Werte der Sensoranzeigen am Ende der Verdichtung bei der fast gleichen mittleren Formstoffdichte der Prüfkörper proportional der Verdichtbarkeit der Formstoffen verändern. So war die Verdichtbarkeit beim Formstoff 4 größer als bei den Formstoffen 2 und 3. Die Sensoranzeige ist für diesen Formstoff auch größer, obwohl die mittlere Dichte der Prüfkörper fast konstant blieb. Bei den Versuchen mit dem Formstoff 1 war die mittlere Dichte der Prüfkörper sogar etwas größer als bei den anderen Formstoffen. Trotzdem hat sich die Sensoranzeige verkleinert (Bilder 4-8 und 4-9). Das geschieht vor allem dadurch, dass die Schüttdichte des Formstoffes mit zu-



Bild 4-7: Verdichtbarkeit, %



Bild 4-8: Mittlere Dichte der Prüfkörper, g/cm³

35



Bild 4-9: Sensoranzeigen, N



Bild 4-10: Formstoffmasse, g


Bild 4-11: Prüfkörperhöhe, mm

nehmender Verdichtbarkeit kleiner wird. Deshalb dauert die Bewegung des Sandes bis zum Erreichen einer gleichen Dichte im Messpunkt bei der Verdichtung eines Formstoffes mit größerer Verdichtbarkeit länger als bei der Verdichtung eines trockneren Formstoffes. Dabei wird der Sensorfühler auch tiefer in das Gehäuse gedrückt.

Die gleichen Ergebnisse haben die Versuche bei der Formstoffdosierung mit einem konstanten Formstoffvolumen und bei der Verdichtung mit einem Pressdruck von 1 MPa geliefert (Bild 4-9). Bei den Versuchen mit den Formstoffen 2 und 3 war der Unterschied zwischen der mittleren Dichte der Prüfkörper noch kleiner als bei den Versuchen mit der Massendosierung. Dementsprechend hat sich der Unterschied zwischen Sensoranzeigen am Ende der Verdichtung auch verkleinert und liegt für alle Messungen im Streuungsintervall. Die Sensoranzeigen für die Formstoffe 1 bis 4 verändern sich auch proportional mit den Verdichtbarkeitwerte der Formstoffen bei den fast gleichen mittleren Dichte der Prüfkörper.

Im Bild 4-9 werden die Sensoranzeigen am Ende der Verdichtung bei den unterschiedlichen Dosiermethoden verglichen. Der Unterschied zwischen den Sensoranzeigen wird bei Volumendosierung mit abnehmender Verdichtbarkeit größer als bei der Dosierung mit einer konstanten Masse. Diese Tatsache wird dadurch erklärt, dass die zu verdichtende Formstoffmasse bei der Volumendosierung mit abnehmender Verdichtbarkeit größer wird (Bild 4-10). Da die dem Formstoff zugeführte Verdichtbarkeit größer wird (Bild 4-10). Da die dem Formstoff zugeführte Verdichtungsenergie immer konstant blieb, verringert sich die mittlere Dichte der Prüfkörper um so größer, je kleiner die Verdichtbarkeit wird (Bilder 4-8). Wesentlich größeren Einfluss auf die Sensoranzeige übt aber die der Zunahme der zu verdichtenden Formstoffmasse entsprechende Vergrößerung der Prüfkörperhöhe (Bild 4-11) aus, da mit der Steigerung der Prüfkörperhöhe die Formstoffdichte am unteren Rand der Prüfkörper bei einem konstanten Verdichtungsdruck kleiner wird. Dadurch verringert sich entsprechend auch die Sensoranzeige.

Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Größe der Sensoranzeige am Ende des Verdichtungsvorganges im wesentlichen nur von der erreichten Dichte des Formstoffes im Messpunkt und dessen Verdichtbarkeit abhängt.

4.3. Konsequenzen

Aus der durchgeführten Analyse der Arbeitsweise der neuen Sensoren und auf der Basis der Untersuchungen zur Bestimmung deren Funktionstüchtigkeit zur Messung der von der Formstoffbewegung im Messpunkt entstehenden Kräften während des Verdichtungsvorganges können folgende Konsequenzen gezogen werden:

 die Sensoranzeigen unterscheiden sich erheblich von den mit den konventionellen Methoden ermittelten Verdichtungskräften bzw. Drücken nicht nur in ihrer Größe, sondern auch im Kurvenverlauf. Deshalb sind die im Kapitel 3 beschriebenen Methoden zur Berechnung der Formstoffdichte durch die während der Verdichtung im Formstoff auftretenden Beanspruchungen bei der Benutzung der neuen Sensoren unbrauchbar und müssen neu erarbeitet werden;

- die Größe der Sensoranzeige wird nur vom erreichten Verdichtungszustand des Formstoffes im Messpunkt und seiner Zusammensetzung nicht aber vom Verdichtungsregime der Formmaschine bestimmt. Deshalb sind die neuen Sensoren zur Qualitätskontrolle der Form im Messpunkt wesentlich besser geeignet als herkömmliche Druck- bzw. Kraftmessdosen;
- bei gleicher Sanddichte im Messpunkt hängt die Sensoranzeige nur von der Verdichtbarkeit des Formstoffes und umgekehrt bei gleicher Verdichtbarkeit hängt die Sensoranzeige nur von der Formstoffdichte ab.

5. Methode zur Bestimmung der Formstoffdichte mittels Sensoranzeige

Wie oben erwähnt, ist es zur Qualitätskontrolle der Gießformen unabdingbar, die Formstoffdichte in gefährdeten Formpartien für jede hergestellte Form kontinuierlich zu überwachen. Aus der im Kapitel 4 durchgeführten Analyse folgt eindeutig, dass sich die Sensoranzeigen erheblich von den mit den konventionellen Methoden ermittelten Verdichtungskräften bzw. -drücken nicht nur in ihrer Größe sondern auch in ihrem Kurvenverlauf unterscheiden. Deshalb sind die bekannten Methoden zur Berechnung der Formstoffdichte durch die Beanspruchungen im Formstoff bei der Anwendung von neuen Sensoren unbrauchbar, und es müssen neue erarbeitet werden. Ziel der Untersuchungen war es, eine solche Berechnungsmethode zu entwickeln und unter praktischen Bedingungen zu erproben.

5.1. Versuche zur Bestimmung der Abhängigkeit zwischen Formstoffdichte und Sensoranzeige

Ziel dieser Untersuchungen war es, einerseits den Typ der Abhängigkeit zwischen Sensoranzeige und Formstoffdichte festzustellen und andererseits die Reproduzierbarkeit der Kurven und die Auswirkung der unterschiedlichen Pressdrucksteigerung auf die Abhängigkeit Dichte = f (Sensoranzeige) zu erforschen. Diese Versuche wurden im Labor an den Prüfkörpern durchgeführt. Für sie wurde die im Bild 4-2 dargestellte Versuchseinrichtung verwendet. Zur Erfassung der Dichteänderung während des Verdichtens wurde zusätzlich ein Wegaufnehmer IWT 401 angebracht, so dass die Höhe des Prüfkörpers und folglich die mittlere Dichte kontinuierlich erfasst wurden. Zur Datenerfassung wurde DAQPad 6020E von National Instruments verwendet. Wie es aus den vorherigen Versuchen hervorgeht, wird die Sensoranzeige nach dem Verdichten umso kleiner, je kleiner die Verdichtbarkeit des Formstoffes ist (Kapitel 4.2.2). Deshalb wurde ein Formstoff mit 9 % Bentonit, 1,8 % Wasser und 29 % Verdichtbarkeit verwendet, was einen extremen Fall darstellt. Dabei ist die Sensoranzeige auch am kleinsten, weil in der Praxis die Formstoffe mit der Verdichtbarkeit niedriger als 30 % kaum verwendet werden. Damit wird die Arbeit des Sensors unter extremen Bedingungen noch mal geprüft. Bei der Formstoffaufbereitung wurde der Sand H32 und Bentonit IKO-BOND-D OE verwendet. Bei den ersten Versuchen wurde der Sensor auf 0,5 N Vorspannung eingestellt. Die Formstoffdosierung erfolgte mit konstanter Formstoffmasse von 150 g. Es wurden 5 Versuche mit der konstanten Pressdrucksteigerung bis zu 2 MPa, wie im Bild 5-1 dargestellt wird, durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind im Bild 5-2 zusammengefasst. Aus diesem Bild geht deutlich hervor, dass bei der konstanten Pressdrucksteigerung und konstanter Formstoffmenge eine fast hundertprozentige Reproduzierbarkeit der Kurven beobachtet wird. Die Anhängigkeit zwischen Sensoranzeige und der Formstoffdichte kann laut Abbildung als linear angenommen werden. Weil mit dem Wegaufnehmer lediglich die mittlere Dichte des Prüfkörpers erfasst wurde, wird am Anfang der Verdichtung eine leichte Abweichung von der linearen Abhängigkeit beobachtet. Das wird dadurch erklärt, dass sich die mittlere Dichte und Dichte im Messpunkt am Anfang der Verdichtung unterscheiden. Die mittlere Dichte ist um die Zeit etwas größer als die Dichte im Messpunkt. Danach wird die Dichte im Querschnitt des Prüfkörpers fast gleich und die Kurve verläuft weiter linear.

Weiterhin wurde die Auswirkung der veränderlichen Pressdrucksteigerung auf die Abhängigkeit zwischen Sensoranzeige und der Formstoffdichte untersucht. Für diese Versuche wurde der Sensor auf 1,5 N Vorspannung eingestellt. Die Untersuchungen wurden mit demselben Formstoff durchgeführt und die Formstoffmasse blieb 150 g gleich. Ein Versuch wurde mit der konstanten Drucksteigerung bis 2 MPa, wie im Bild 5-1 dargestellt wird, durchgeführt. Die zwei weiteren Versuche wurden mit veränderlichen Drucksteigerung bis 5 MPa, wie im Bild 5-3 dargestellt wird, durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Bild 5-4 zusammengefasst. Man sieht, dass die Pressdrucksteigerung keine Auswirkung sowohl auf den Kurvenverlauf als auch auf dessen Reproduzierbarkeit ausübt. Das lässt die Aussage zu, dass bei einer Pressdrucksteigerung ermittelte Abhängigkeit bei jeder anderen Drucksteigerung erhalten bleibt, was die Übertragung der Laboruntersuchungen auf praktische Bedingungen bezogen der Verdichtungsregime zulässt.



Bild 5-1: Pressdrucksteigerung für Versuche 1 – 5



- Versuch 1 - Versuch 2 - Versuch 3 - Versuch 4 - Versuch 5

Bild 5-2: Abhängigkeit Dichte/Sensoranzeige bei den konstanten Pressdrucksteigerung



Bild 5-3: Pressdrucksteigerung für Versuche 4 – 5



Bild 5-4: Vergleich der Abhängigkeiten Dichte/Sensoranzeige bei den unterschiedlichen Verdichtungsregimen.

5.2. Untersuchungen der Abhängigkeit Dichte = f (Sensoranzeige) für einen konstanten Formstoff bei den unterschiedlichen Sensorvorspannungen

Die Sensorvorspannung spielt bei den Messungen eine wichtige Rolle. Einerseits ist die Signalveränderung mit gleichem Formstoff bei der Verdichtung einer konstanten Formstoffmenge umso kleiner, je größer die Vorspannung ist. Bei der Herstellung einer Vielzahl von Formen kann der Sensorfühler durch Verschmutzung und Klebewirkung des Bentonits eingeklemmt werden. Andererseits muss die Vorspannung groß genug sein, um den Sensorfühler nach dem Modelltrennen in die Nullposition zurückzubringen, ohne dass ein manuelles Freilegen erforderlich ist. Ziel der Untersuchungen war es, eine solche Sensorvorspannung zu finden.

Bei den Untersuchungen wurde der im Kapitel 5.1 beschriebene Formstoff angewendet. Die Formstoffdosierung erfolgte mit einer konstanten Formstoffmasse von 150 g. Das Verdichtungsregime war bei allen Versuchen (wie im Bild 5-1 abgebildet) konstant. Der Sensor wurde auf eine Vorspannung von 0,3 bis 0,8 N in der Schrittweite von 0,1 N eingestellt. Außerdem wurden die Versuche mit der Vorspannung des Sensors von 1,0 und 1,5 N durchgeführt. Für jede Sensorvorspannung wurden drei Versuche durchgeführt. Die Messergebnisse sind im Bild 5-5 dargestellt. Aus diesem Bild geht eindeutig hervor, dass die Sensorvorspannung nur den Dichtewert (weiter Startdichte genannt) bestimmt, von dem ab der Sensor zu reagieren beginnt. Die Startdichte ist folglich die Dichte des Prüfkörpers, bei der die Spannung im Formstoff so groß ist, dass auf den kugelförmigen Sensorfühler eine aus der Zusammenwirkung horizontaler und seitlicher Spannungen resultierende Kraft wirkt, die der Vorspannungskraft gleich ist. Je größer die Sensorvorspannung ist, desto größer ist die Startdichte. Die Veränderung der Startdichte in Abhängigkeit von der Sensorvorspannung ist im Bild 5-6 gezeigt. Auf den Kurvenverlauf hat die Sensorvorspannung im untersuchten Vorspannungsbereich keine Auswirkung, da die Kurven parallel sind. Für alle weiteren Untersuchungen wird eine Sensorvorspannung von 0,7 N ausgewählt, weil bei dieser Vorspannung einerseits die Empfindlichkeit des Sensors groß genug



Bild 5-5: Abhängigkeit Dichte/Sensoranzeige bei den unterschiedlichen Sensoreinstellungen



Bild 5-6: Startdichte in Abhängigkeit von der Sensoreinstellung

ist und andererseits diese Vorspannung eine problemlose Rückkehr des Sensorfühlers in die Nullposition nach dem Modelltrennen gewährleistet.

5.3. Untersuchungen der Auswirkung einer veränderlichen Fülldichte für einen konstanten Formstoff auf die Startdichte

Wie oben genannt wurde, sind die Startdichte und die Fülldichte eines Formstoffes zwei ganz unterschiedliche Größen. Die Startdichte für einen Formstoff ist normalerweise größer als die Fülldichte (Bild 5-7), was für die Praxis einen wesentlichen Vorteil schafft. Es ist bekannt, dass für die Beurteilung der Verdichtungscharakteristik von Formmaschinen die Schüttdichte, wie es im Labor bestimmt wird, und die Verdichtbarkeit nicht ohne weiteres als Absolutwerte verwendet werden dürfen. Bei einer bestimmten Formmaschine muss immer der Grad der Vorverdichtung bekannt sein, der durch das Schütten des Sandes aus einer bestimmten Höhe in den Formkasten entsteht. Diese Fülldichte wird höher als das Laborschüttdichte sein (Bild 5-8). Außerdem kann sich die Fülldichte des Formstoffes in den Formballen mit verschiedener Schwierigkeit erheblich unterscheiden. In schwierigen Ballen ist die Fülldichte immer kleiner als die Fülldichte in einfacheren Ballen und im gesamten Formkasten, obwohl die Verdichtbarkeit des Formstoffes gleich ist. Deshalb ist es sehr wichtig zu wissen, ob die Startdichte bei einem konstanten Formstoff von der Fülldichte abhängig ist. Dies hat einen sehr großen Einfluss auf die Übertragbarkeit der im Labor erhaltenen Startdichtewerte auf die sich in der Praxis einstellenden Werte.

Für diese Untersuchungen wurde ein Formstoff mit 9 % Bentonit IKO BOND D OE und 4 % Kohlenstaub (C-Träger Probe D) verwendet. Die Verdichtbarkeit betrug 45,7 %. Es wurden drei Messungen bei der Formstoffdosierung wie bei der Verdichtbarkeitprüfung durchgeführt. Die Fülldichtedichte betrug immer 825 kg/m³ (Bild 5-9). Die Proben wurden durch Pressen verdichtet. Bei drei weiteren Versuchen wurde der Formstoff genau so wie vorher dosiert, d.h. die Formstoffmasse blieb ungeändert, danach gerüttelt, so dass vor dem Pressen die Fülldichtedichte des Formstoffes größer wurde. Aus dem Bild 5-9 geht deutlich hervor, dass die Startdichte trotz der Erhöhung



Bild 5-7: Fülldichte und Startdichte in Abhängigkeit von der Verdichtbarkeit für einen Formstoff mit 7 % Bentonit und 4 % Kohlenstaub



Bild 5-8: Verdichtungskurve



Bild 5-9: Startdichte beim konstanten Formstoff und verschiedenen Fülldichtewerten

der Fülldichte praktisch konstant geblieben ist. Das bedeutet, dass die Startdichte nur vom Spannungszustand des Formstoffes abhängt und die im Labor ermittelten Startdichtewerte auf die betrieblichen Bedingungen übertragbar sind. Das erweitert den Nutzungsbereich des Sensors auf das Rüttelpressen. Der Sensor soll in dem Fall so eingestellt werden, das die Startdichte größer als die nach dem Rütteln erreichbare Dichte ist. So wird nur die Dichtesteigerung beim nachfolgenden Pressen erfasst.

5.4. Untersuchungen der Abhängigkeit Dichte = f (Sensoranzeige) für einen konstanten Formstoff bei der Verdichtung von unterschiedlichen Formstoffmengen

Auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen wird nun angenommen, dass die Abhängigkeit zwischen Dichte und Sensoranzeige linear ist. Das bedeutet, dass die Formstoffdichte im Messpunkt kontinuierlich während des Verdichtens nach folgender Gleichung berechnet werden kann:

$$\rho = \rho_N + k \cdot S ; \tag{5.1}$$

wobei ρ - Dichte im Messpunkt, kg/m³;

- ρ_N Startdichte, kg/m³;
- k Koeffizient, c²/m⁴;
- S Sensoranzeige, N;

Die Startdichte ist in dem Fall nicht die Schüttdichte des Formstoffes. Sie stellt die Formstoffdichte dar, ab der der Sensor die von der Sandbewegung entstehende Kraft zu messen beginnt. Die Startdichte und der Koeffizient *k* müssen daher bekannt sein, bevor die Messung direkt an der Form stattfinden kann. Dafür sollte zunächst die Kalibrierkurve bestimmt werden, auf deren Basis diese Koeffizienten ermittelt werden können. Bei den oben beschriebenen Messungen wurde immer die Abhängigkeit zwischen mittlerer Dichte und der Sensoranzeige gemessen. Diese Kurve kann als Kalibrierkurve dienen, wenn die mittlere Dichte im Prüfkörperquerschnitt und die Dichte im Messpunkt übereinstimmen bzw. gleich sind. In der Praxis sieht es aber anders aus. Wie erwähnt wurde, ist am Anfang des Verdichtens die mittlere

Dichte etwas größer als die Dichte im Messpunkt. Damit erscheint es logisch, dass die Startdichte umso genauer ermittelt werden kann, je größer das Verhältnis Probekörperdurchmesser/Probekörperhöhe ist. Mit der Steigerung des Pressdruckes werden die Formstoffdichte im Querschnitt des Prüfkörpers und die Dichte im Messpunkt fast gleich und die Kalibrierkurve wird praktisch linear. Damit kann der Koeffizient k ermittelt werden.

An dieser Stelle ist es sinnvoll einige Einschränkungen für weitere Untersuchungen vorzunehmen. In der Praxis wird bei der automatischen Formherstellung mit den Formstoffen gearbeitet, deren Verdichtbarkeit in den Grenzen von 30 bis 45 % liegt. Für Forschungszwecke werden die Verdichtbarkeitsgrenzen von 30 bis 50 % erweitert.

Ziel dieser Untersuchungen war es, die zu verdichtende Formstoffmasse und den maximal benötigten Pressdruck zum Erhalt einer Kalibrierkurve festzustellen, damit die Startdichte und der Koeffizient k möglichst genau bestimmt werden können. Die Untersuchungen wurden mit zwei Formstoffen mit den Verdichtbarkeiten von 32,4 und 50,5 % und einem Bindetongehalt von 9 und 7 % durchgeführt.

5.4.1. Versuchsergebnisse bei der Verdichtbarkeit des Formstoffes von 32,4 %

Der bei diesen Versuchen verwendete Formstoff enthielt 9 % Bentonit und 1,85 % Wasser und hatte eine Verdichtbarkeit von 32,4 %. Um die optimal zu verdichtende Formstoffmasse und den maximal benötigten Pressdruck zu bestimmen, wurden die Versuche mit den Formstoffmassen von 70, 100, 125 und 150 g durchgeführt. Bei allen Versuchen wurde der Formstoff mit maximalen Druck von 5 MPa verdichtet. Die Messungen für jede Masse wurden jeweils 3 mal wiederholt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind im Bild 5-10 zusammengefasst.

Wie zu erwarten war, vergrößert sich die Startdichte mit zunehmender Formstoffmasse. Das geschieht vor allem dadurch, dass sich mit zunehmender Formstoffmasse die Prüfkörperhöhe und folglich der Unterschied zwischen mittlerer Dichte und der Dichte im Messpunkt am Anfang des Verdichtens vergrößern. In dem Fall wäre es logisch, als Kalibrierkurve die Messergebnis mit der Formstoffmasse von 70 g anzunehmen. Man erkennt aber, dass, obwohl am Anfang des Verdichtungsvorganges alle Kurven fast gleich verlaufen, die Kurve für die Formstoffmasse von 70 g zu allen anderen Kurven differiert. Das resultiert daraus, dass sich der Formstoff wegen der kleinen Prüfkörperhöhe anders als bei größeren Formstoffmassen zu bewegen beginnt. Deshalb ist diese Kurve für die Bestimmung des Koeffizienten *k* und folglich als Kalibrierkurve ungeeignet. Wesentlich besser passen dafür die Messergebnisse mit der Formstoffmassen von 100 g. Aus dem Vergleich des Kurvenverlaufs für die Formstoffmassen von 100, 125 und 150 g ergibt sich, dass sie sich nicht mehr überschneiden. Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Messergebnisse für 100 g Formstoff als Kalibrierkurve zur Dichteberechnung auf der Basis der Sensoranzeige dienen können.

In den Bilder 5-11 – 5-13 sind die einzelnen Kurven für die Messergebnisse mit den Formstoffmassen entsprechend von 100, 125 und 150 g gezeigt. Aus diesen Bildern geht deutlich hervor, dass die lineare Phase nicht ab Punkt A (Startdichte) sondern ab Punkt C beginnt. Wegen des Unterschiedes zwischen der mittleren Dichte und der Dichte im Messpunkt nimmt die Sensoranzeige nicht so schnell zu, wie es im Fall der Gleichheit zwischen der mittleren Dichte und Dichte im Messpunkt zu erwarten wäre. Dieser Fall wird in den Bildern als "Ideale Kalibrierkurve" bezeichnet. Diese lineare Phase beginnt bei der Formstoffmasse 100 g ab einer Prüfkörperdichte von ca. 1380 kg/m³ und stellt die "Praktische Kalibrierkurve" dar. Das bedeutet, dass ab dieser Prüfkörperdichte die mittlere Dichte und die Dichte im Messpunkt übereinstimmen. Weiter ist die Abhängigkeit $\rho = f(S)$ linear. Bei zwei anderen Formstoffmassen beginnt die lineare Phase etwas später als bei der Formstoffmasse von 100 g. Wird die Gerade ab Punkt C als Kalibrierkurve benutzt, bedeutet das, dass die Formstoffdichte im Messpunkt an der Form bis zu dem dem Punkt C entsprechenden Dichtewert mehr oder weniger falsch berechnet wird. Für die Praxis ist interessant, die Formstoffdichteentwicklung beginnend ab ca. 1400 kg/m³ zu kennen. Bei einer Formstoffdichte



Bild 5-10: Abhängigkeit ho = f(S) bei verschiedenen Formstoffmassen



Bild 5-11: Abhängigkeit $ho{=}f(S)$ bei der Formstoffmasse von 100 g



Bild 5-12: Abhängigkeit $ho{=}f(S)$ bei der Formstoffmasse von 125 g



Bild 5-13: Abhängigkeit $ho{=}f(S)$ bei der Formstoffmasse von 150 g

bis 1400 kg/m³ sind die Festigkeitswerte noch unzureichend. Deshalb muss dieser Bereich bei der Qualitätskontrolle als Bereich mit unzureichender Formqualität nicht beachtet werden (In der Praxis ist dieser Bereich manchmal sogar noch größer). Von den drei untersuchten Formstoffmassen liegt der Punkt C nur bei der Formstoffmasse von 100 g unter 1400 kg/m³. Deshalb ist es sinnvoll, die Formstoffmenge von 100 g in einer Hülse mit dem Durchmesser von 50 mm zu verdichten und die resultierende Kurve ab einer Prüfkörperdichte von 1380 kg/m³ als Kalibrierkurve zu benutzen und damit die Koeffizienten für die Dichteberechnung auf der Basis der Sensoranzeige zu bestimmen. Die Verdichtung mit einem Pressdruck von 2 MPa ist empfehlenswert, damit die Koeffizienten möglichst genau bestimmt werden können.

Die mit dieser Methode ermittelten Koeffizienten werden in einem Programm zur Datenerfassung und Bearbeitung eingegeben, damit die Formstoffdichte direkt an der Form in gefährdeten Formpartien bestimmt werden kann. In diesem Fall sieht die Gleichung 5.1 folgendermaßen aus:

$$\rho = \rho'_N + k' \cdot S \tag{5.2}$$

wobei ρ - Dichte im Messpunkt, kg/m³;

- $\dot{\rho_N}$ durch die "Praktische Kalibrierkurve" ermittelte Startdichte (Punkt B), kg/m³;
- *k*['] durch die "Praktische Kalibrierkurve" ermittelter Koeffizient, s²/m⁴;
- S Sensoranzeige, N;

Man sieht, dass sich die Startdichte ρ_N (Punkt A) und die durch die "Praktische Kalibrierkurve" ermittelte Startdichte ρ'_N (Punkt B) unterscheiden. Deshalb ist die auf der Basis der Sensoranzeige berechnete Dichte bis Punkt C also bis 1380 kg/m³ etwas größer als die Dichte im Messpunkt. Nach diesem Punkt stimmen die beiden Dichtewerte überein. Wird der Sensor so eingestellt, dass die Anzeige erst ab einer Prüfkörperdichte von ca. 1400 ÷ 1420 kg/m³ beginnt, entfällt vermutlich die nichtlineare Phase zwischen Punkten A und C, da die mittlere Dichte und die Dichte im Messpunkt schon gleich sind. 5.4.2. Versuchsergebnisse bei der Verdichtbarkeit des Formstoffes von 50,5 %

Der bei diesen Versuchen verwendete Formstoff enthielt 7 % Bentonit und 2,0 % Wasser und hatte die Verdichtbarkeit von 50,5 %. Um die optimal zu verdichtende Formstoffmasse und den maximal benötigten Pressdruck zu bestimmen, wurden die Versuche mit Formstoffmassen von 70, 100, 125 und 150 g durchgeführt. Bei allen Versuchen wurde der Formstoff mit maximalen Druck von 5 MPa verdichtet. Die Messungen für jede Masse wurden jeweils 3 mal wiederholt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind im Bild 5-14 zusammengefasst.

Wie man sieht, vergrößert sich die Startdichte mit zunehmender Formstoffmasse, wie es im vorherigen Kapitel beschrieben wurde. Die aus der Messung mit der Formstoffmasse von 70 g resultierende Kurve verläuft auch am Anfang des Verdichtungsvorganges den anderen Kurven ähnlich, doch dann weicht die Kurve ab und überschreitet die anderen. Die mögliche Ursache dafür wurde im Kapitel 5.4.1 beschrieben. Das lässt die Aussage zu, dass die Formstoffmasse von 70 g für das Erhalten der Kalibrierkurven zur Bestimmung des Koeffizienten k für die Formstoffen mit einer Verdichtbarkeit von 30 bis 50 % ungeeignet ist. Bei den üblichen Kurven wird dasselbe Bild wie beim Formstoff mit der Verdichtbarkeit von 32,4 % beobachtet. Aus der Analyse der einzelnen Kurven (Bilder 5-15 – 5-17) geht deutlich hervor, dass die lineare Phase bei der Verdichtung einer Formstoffmenge von 100 g früher als bei den Formstoffmassen von 125 oder 150 g eintritt. Die Gerade beginnt wie bei den Versuchen mit dem Formstoff mit der Verdichtbarkeit von 32,4 % ab der Prüfkörperdichte von ca. 1380 kg/m³. Weil die Kraftwirkung des Sandes auf den Messfühler bei dem Formstoff mit der Verdichtbarkeit von 50,5 % wesentlich früher beginnt als bei dem Formstoff mit der Verdichtbarkeit von 32,4 %, ist die aufgenommene nichtlineare Phase auch größer (aus den Bildern 5-11und 5-15). Der Vergleich der Mess- und Analyseergeb-



Bild 5-14: Abhängigkeit ho = f(S) bei verschiedenen Formstoffmassen



Bild 5-15: Abhängigkeit $ho{=}f(S)$ bei der Formstoffmasse von 100 g



Bild 5-16: Abhängigkeit $ho{=}f(S)$ bei der Formstoffmasse von 125 g



Bild 5-17: Abhängigkeit $ho{=}f(S)$ bei der Formstoffmasse von 150 g

nisse für beide Formstoffe lässt die Schussfolgerung zu, dass die im Kapitel 5.4.1 vorgeschlagene Methode sowohl zum Erhalten von Kalibrierkurven als auch für die nachfolgende Berechnung der Koeffizienten ρ'_{N} und k' für die Formstoffen mit Verdichtbarkeiten von 30 bis 50 % benutzt werden kann. Die Richtigkeit der Methode soll durch die Untersuchungen direkt an einer Form bestätigt werden.

5.5. Bestimmung der Rückfederung des Formstoffes auf der Basis der Sensoranzeige

Beim Verdichten verändert sich das Formstoffvolumen unter der Wirkung einer Verdichtungskraft bzw. –drucks. Nach dem der Formstoff von der Wirkung dieser Kraft entlastet wird, bleibt meistens das Formstoffvolumen nicht konstant, sondern vergrößert sich wegen der Formstoffbeanspruchung (somit verkleinern sich die Formdichte und –festigkeit). Eine solche Formstoffrückfederung kann besonders gut beim Pressen mit hohen Drücken beobachtet werden. Wird die Rückfederung zu groß, kann sie die Form- und folglich die Gussqualität negativ beeinflussen. Deshalb war eine der Aufgaben bei der Erarbeitung der Messtechnik, eine Kontrolle der Formqualität bis zum Modelltrennen zu ermöglichen. Es sollte also ermöglicht werden, die Rückfederung des Formstoffes (Veränderung der Formstoffdichte) im Messpunkt zu erfassen.

Im Bild 5-18 sind die Ergebnisse von zwei Messungen dargestellt. Diese Messungen erfolgten mit Hilfe der im Bild 4-3 dargestellten Versuchseinrichtung. Der Sensorvorspannung betrug 1,5 N. Zur Aufnahme der Veränderung der Prüfkörperdichte während der Verdichtung wurde wie bei den vorherigen Versuchen ein Wegaufnehmer eingesetzt. Bei den Messungen wurde der gleiche Formstoff (Bentonitgehalt 9 %, Wassergehalt 1,8 %) mit einer Verdichtbarkeit von 29 % angewendet. Beim ersten Versuch wurde der Formstoff (Formstoffmasse 150 g) mit dem Pressdruck bis zu 2 MPa verdichtet. Man sieht deutlich, dass während des Entlastens des Prüfkörpers die Sensoranzeige und die Formstoffdichte etwas zurückgegangen sind. Danach wurde die Höhe des Prüfkörpers mit einem Messschieber gemessen und in Dichtewerte umgerechnet. Damit wurde die Dichte des Prüfkörpers unter Berücksichtigung der Rückfederung gemessen. Diese Dichte stimmt mit der nach den Angaben des Wegaufnehmers ermittelten Dichte am Ende des Rückzuges der Sensoranzeige fast hundertprozentig überein. Dies bedeutet, dass die Rückfederung des Formstoffs im Messpunkt, die auf der Basis der Sensoranzeige berechnet wird, exakt bestimmt werden kann. Damit wird die Endqualität der Form bestimmbar.

Beim zweiten Versuch wurde dieselbe Formstoffmasse wie beim ersten Versuch mit dem Pressdruck von 5 MPa verdichtet. Aus den Messergebnissen geht deutlich hervor, dass der Rückzug der Sensoranzeige und die mit Hilfe des Wegaufnehmers bestimmte Formstoffdichte in dem Fall größer werden als bei der vorherigen Messung. Das stimmt mit den theoretischen Vorstellungen überein, dass mit steigendem Pressdruck die Formstoffrückfederung größer werden muss. Die Formstoffdichte nach dem Entlasten des Formstoffes wurde wie bei dem Versuch 1 mit dem Messschieber gemessen. Diese Dichte stimmt auch mit der Dichte am Ende des Rückzuges der Sensoranzeige überein.

Im Bild 5-19 sind die Ergebnisse von zwei Versuchen mit der Sensorvorspannung von 0,7 N dargestellt. Beim Versuch 3 wurde derselbe Formstoff wie bei den Versuchen 1 und 2 verwendet. Die Formstoffmasse von 150 g wurde mit dem Pressdruck von 2 MPa verdichtet. Die weitere Vorgehensweise war wie bei den Versuchen 1 und 2. Beim Versuch 4 wurde der Formstoff (Bentonitgehalt 9 %, Wassergehalt 1,85) mit einer Verdichtbarkeit von 32,4 % verwendet. Die Verdichtung erfolgte bis zu 5 MPa. Man sieht, dass die mit dem Messschieber ermittelte Dichte bei beiden Versuchen mit der Dichte am Ende des Rückzuges der Sensoranzeige übereinstimmt. Die Größe der Rückfederung stimmt auch bei der Sensoreinstellung auf 0,7 N mit den theoretischen Vorstellungen überein.

Aus dem Vergleich der Messergebnisse in Bilder 5-18 und 5-19 geht außerdem deutlich hervor, dass bei den unterschiedlichen Vorspannungen des Sensors beim gleichen Pressdruck gleiche Rückfederungsgrößen festgestellt



Bild 5-18: Rückfederung bei der Sensorvorspannung von 1,5 N



Bild 5-19: Rückfederung bei der Sensorvorspannung von 0,7 N

wurden. Das heißt, dass die Vorspannung des Sensors für die Bestimmung der Formstoffrückfederung keine Rolle spielt.

5.6. Genauigkeit der Methode zur Berechnung der Formstoffdichte auf der Basis der Sensoranzeige

Im diesen Kapitel wird die Genauigkeit der Berechnung der Formstoffdichte im Messpunkt auf der Basis der Sensoranzeige mit der Berücksichtigung der vorher erarbeiteten Methoden zur Gewinnung der Kalibrierkurven bestimmt.

Für die Auswertung wurden die Messergebnisse bei den Formstoffen mit 7 % Bentonit IKO BOND D OE und 4 % Kohlenstaub C-Träger Probe D genommen. Die Verdichtbarkeit betrug bei den angewendeten Formstoffen 28,9; 34,8; 43,8 und 50,7 %. Die Versuchsbedingungen wurden wie beim Gewinnen der Kalibrierkurven mit dem Unterschied eingestellt, dass die Prüfkörper bis zu einer konstanten Dichte von 1630 kg/m³ (gemessen mit Hilfe des Wegaufnehmers) verdichtet wurden. Für jeden Verdichtbarkeitswert wurden die Messungen sieben mal wiederholt. Danach wurden mit Hilfe der speziellen PC-Anwendung die für die Dichteberechnung benötigten Koeffizienten $\rho_{\scriptscriptstyle N}^{'}$ und $_{k}^{'}$ (Gleichung 5.2) bestimmt. Die Messergebnisse sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst. Für die durchgeführten Untersuchungen wird eine Normalverteilung der Fehler angenommen. Die Normalverteilung wird durch die zwei Parameter: Erwartungswert μ und Streuung σ^2 bezeichnet. Für die durchgeführten Versuche haben die einzelnen Messungen χ_i die gleiche Wahrscheinlichkeit, deshalb ergibt sich die Einschätzung für die Erwartungswerte aus der Gleichung (5.3).

$$\mu = \frac{1}{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n},$$
(5.3)

wobei i - Versuchsnummer;

n – Anzahl der Versuche.

Die Streuung wird nach der Formel (5.4) berechnet.

$$\sigma^{2} = S^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_{i} - \overline{x})^{2}}{n - 1}$$
(5.4)

Die Einschätzung für die Streuung σ wird aus der Gleichung (5.5) bestimmt.

$$S_x = \sqrt{S} \tag{5.5}$$

Tabelle 5-2

Verdichtbarkeit, %	Messung –		12/ 0.4	Sensorsignal bei der Dichte	
	Nr.	${oldsymbol{ ho}}_N$, kg/m³	K C ² /m ⁴	von 1630 kg/m³	
28,9	1	1327	254,065	1,194	
	2	1329	244,858	1,231	
	3	1324	248,501	1,231	
	4	1321	254,324	1,216	
	5	1318	244,858	1,276	
	6	1329	252,270	1,194	
	7	1320	250,250	1,239	
34,8	1	1274	256,148	1,389	
	2	1281	244,618	1,427	
	3	1277	254,065	1,389	
	4	1267	256,148	1,419	
	5	1282	256,148	1,359	
	6	1277	248,509	1,419	
	7	1288	250,250	1,367	
43,8	1	1226	256,149	1,577	
	2	1226	256,148	1,577	
	3	1230	256,148	1,562	
	4	1230	260,146	1,539	
	5	1232	252,270	1,577	
	6	1229	250,501	1,599	
	7	1228	252,270	1,592	
50,7	1	1213	256,148	1,629	
	2	1203	254,065	1,682	
	3	1207	256,148	1,652	
	4	1203	262,329	1,629	
	5	1211	256,148	1,637	
	6	1202	260,146	1,644	
	7	1201	264,271	1,622	

Der aus der Gleichung (5.5) erhaltene Wert dient als Genauigkeitsgrad der einzelnen Messung. Der Genauigkeitsgrad für alle Messungen ergibt sich aus der Formel (5.6) und beträgt in diesem Fall

$$S_{\overline{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \tag{5.6}$$

Das Streuungsintervall für die einzelne Messung ist nach der Gleichung (5.7)

$$\overline{x} - t_{\alpha} \cdot S_x \le x_i \le \overline{x} + t_{\alpha} \cdot S_x \tag{5.7}$$

und für den Erwartungswert nach der Gleichung (5.8) zu bestimmen.

$$\overline{x} - t_{\alpha} \cdot S_{\overline{x}} \le \mu \le \overline{x} + t_{\alpha} \cdot S_{\overline{x}}$$
(5.8)

wobei t_{α} - Student-Koeffizient bei der Wahrscheinlichkeit $P = 1 - \alpha$.

Für den Freiheitsgrad f = 6 und α = 0,05 ist der Student - Koeffizient gleich 2,447. Damit werden die Streuungsintervalle für die einzelnen Messungen und für die Erwartungswerte mit der Wahrscheinlichkeit von 95 % bestimmt. Die entsprechenden Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 5-3 zusammengefasst.

Weil die Dichte des Prüfkörpers auf der Basis der Wegaufnehmeranzeige berechnet wird, werden die Streuungsintervalle der Koeffizienten $ho_{\scriptscriptstyle N}^{'}$ und ${\scriptstyle k}^{'}$ sowohl für Erwartungswerte als auch für einzelne Messungen einerseits von der Genauigkeit des Sensors und andererseits von der Genauigkeit des Wegaufnehmers bestimmt. Mittlere relative Ungenauigkeit für den Erwartungswert für $ho_{\scriptscriptstyle N}'$ beträgt für die Formstoffe mit der Verdichtbarkeit von 30 bis 50 % mit der Wahrscheinlichkeit von 95% \pm 0,361 % des Erwartungswertes. Mittlere relative Ungenauigkeit für den Erwartungswert für k' beträgt für die Formstoffe mit der Verdichtbarkeit von 30 bis 50 % mit der Wahrscheinlichkeit von 95 % ± 1,54 % des Erwartungswertes. Werden die Kalibrierkurve bzw. die Erwartungswerte der Koeffizienten ρ'_{N} und k' festgestellt, ist die Genauigkeit der Messung an der Form nur von der Genauigkeit des Sensors (Streuung für die einzelne Messung) bestimmt. Die durchgeführte Analyse lässt die Schlussfolgerung zu, dass die durchschnittliche Abweichung des Sensorsignals von der Kalibrierkurve umgerechnet in Weg des Sensorfühlers \pm 0,054 mm beträgt. Das Messbereich des dargestellten Sensors ist 800 kg/m³ von der Startdichte gleich. Für diese Sensorausführung unter Anwendung der vorgestellten Methode zur Gewinnung der Kalibrierkurven beträgt maximale Ungenauigkeit der Dichteberechnung auf der Basis der Sensoranzeige im Messpunkt \pm 15 kg/m³.

Tabel	le	5-3
-------	----	-----

Verdichtbarkeit, %	28,9	34,8	43,8	50,7
Erwartungswert für $ ho_{\scriptscriptstyle N}^{\prime}$, kg/m³	1324	1278	1228,7	1205,7
Streuung für einzelne Messung, kg/m ³	±10,24	±16,32	±5,434	±11,537
Streuung für Erwartungswert, kg/m ³	±4,71	±6,67	±2,21	±4,71
Maximal mögliche relative Ungenauig- keit für einzelne Messung, %	±0,83	±1,3	±0,44	±0,96
Relative Ungenauigkeit für Erwar- tungswert, %	±0,36	±0,52	±0,18	±0,39
Erwartungswert für k' , c²/m^4	249,875	252,27	254,8	258,465
Streuung für einzelne Messung, c²/m^4	±9,75	±11,158	±8,05	±9,298
Streuung für Erwartungswert, c²/m^4	±3,98	±4,55	±3,3	±3,792
Maximal mögliche relative Ungenauig-	±3,9	±4,42	±3,1	±3,59
Relative Ungenauigkeit für Erwar- tungswert, %	±1,59	±1,8	±1,3	±1,47
Erwartungswert für Sensorsignal bei der Dichte von 1630 kg/m³, N	±1,226	±1,396	±1,575	±1,642
Streuung für einzelne Messung, N	±0,068	±0,066	±0,048	±0,049
Streuung für Erwartungswert, N	±0,028	±0,0267	±0,0196	±0,0203
Maximal mögliche relative Ungenauig- keit für einzelne Messung, %	±5,5	±4,72	±3,04	±2,98
Relative Ungenauigkeit für Erwar- tungswert, %	±2,28	±1,91	±1,24	±1,23

Die Sensorgenauigkeit und folglich die Genauigkeit der Dichteberechnung auf der Basis der Sensoranzeige kann wesentlich vergrößert werden, indem sein Messbereich verkleinert wird, was durch die sinnvolle Auswahl des Fühlerdurchmesser und der Federrate zu erreichen ist. Die Einstellung der Startdichte erfolgt über die Federvorspannung, so dass der Sensor im für die Formqualität wichtigen Verdichtungsbereich zu messen beginnt. Die Sensorgenauigkeit und sein Messbereich sollen nach Einsatzbedingungen ausgewählt werden. Werden bei der Verdichtung hohe Formstoffdichten und damit auch hohe Formfestigkeiten erreicht, können die Sensoren mit dem größeren Messbereich und kleinerer Genauigkeit eingesetzt werden. Wenn aber der Messpunkt in einer schwer zu verdichtenden Formpartie liegt, wo eine kleine Abweichung von der Solldichte- und Sollfestigkeitswerten zu den Gussausschuss führt, dann soll die Sensorausführung mit einem kleineren Messbereich und mit der größeren Genauigkeit eingesetzt werden.

5.7. Konsequenzen

Im Kapitel 5 wurden die Untersuchungen zur Erarbeitung der Methode zur Gewinnung der Kalibrierkurven und zur nachfolgenden Berechnung der Formstoffdichtewerte im Messpunkt auf der Basis der Sensoranzeige beschrieben. Die auf der Basis dieser Untersuchungen vorgeschlagene Methode wurde sorgfältig sowohl unter Labor- als auch unter Betriebsbedingungen geprüft. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen und Prüfungen lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- für die Formstoffe mit der Verdichtbarkeit im Bereich von 30 bis 50 % hat die Geschwindigkeit der Pressdrucksteigerung keine Auswirkung auf die Abhängigkeit zwischen Sensoranzeige und Formstoffdichte;
- die Abhängigkeit zwischen Sensoranzeige und Pr
 üfkörperdichte kann linear angenommen werden, sobald die mittlere Dichte des Pr
 üfkörpers und die Dichte des Formstoffes im Messpunkt gleich sind;
- mit steigender Sensorvorspannung nehmen auch die Startdichte und folglich der Koeffizient ρ'_N zu. Auf die Form der Abhängigkeit zwischen Sensoranzeige und Formstoffdichte hat die Sensorvorspannung keine spürbare Auswirkung;
- die Startdichte ist bei konstanter Sensorvorspannung und bei einem konstanten Formstoff von der Fülldichte des Formstoffes unabhängig;
- zur Gewinnung der Kalibrierkurven zur Berechnung der Formstoffdichte im Messpunkt auf der Basis der Sensoranzeige soll eine Formstoffmasse von 100 g mit einem Pressdruck von mindestens 2 MPa in

einer Hülse mit dem Durchmesser vom 50 mm verdichtet werden. Der Presskolbenweg und die Sensoranzeige sollen während der Verdichtung kontinuierlich erfasst werden;

- nach dem Erhalten der Kalibrierkurve werden mittels einer Regressionsanalyse des Kurvenabschnitts ab der Prüfkörperdichte von 1380 kg/m³ bis zur maximal erreichten Dichte die Koeffizienten ρ'_{N} und k'ermittelt. Die Methode gilt für die Formstoffe mit der Verdichtbarkeit von 30 bis 50 %;
- die Formstoffrückfederung nach der Presseentlastung kann auf der Basis der Sensoranzeige ermittelt werden;
- die Genauigkeit der Methode zur Berechnung der Formstoffdichte auf der Basis der Sensoranzeige beträgt bei Anwendung der oben beschriebenen Sensorprototypen ± 15 kg/m³. Sie kann aber wesentlich vergrößert werden, wenn der Messbereich des Sensors verkleinert wird;
- zur betrieblichen Nutzung soll die Sensorkonstruktion und vor allem die Genauigkeit des Sensors und der Anlage zur Kalibrieren der Sensoren entsprechend verbessert werden.

6. Einfluss der Formstoffzusammensetzung auf die Koeffizienten ρ_N

und k'

Die vorher ermittelten Methoden zur Berechnung der Formstoffdichte in gefährdeten Formpartien auf der Basis der Sensoranzeige gelten unter der Voraussetzung, dass der bei der Gewinnung der Kalibrierkurven angewendete Formstoff auch bei der Qualitätskontrolle direkt an der Form konstant bleibt, was aber nicht vollständig der Praxis entspricht. Vor allem in der Eisengießerei besteht der zur Herstellung der Formen dienende Sand zu einem überwiegenden Anteil aus wiederaufbereiteten Altsand, der beim Auspacken abgegossener Formen anfällt und sich im wesentlichen aus Altformsand und meist auch Altkernsand zusammensetzt. Bei der Wiederaufbereitung zu Einheitssand oder zu Modell- und Füllsand wird er mit den Zusätzen von Bentonit, Kohlenstaub oder ähnlichen Stoffen und durch direkt zugesetzten Neusand aufgefrischt. Der Kreislaufsand besteht im wesentlichen aus zwei Teilen: Sandteil und Schlämmstoff. Der Sandteil in betrieblichen Kreislaufsanden besteht nicht nur aus reinem Quarzsand. Dazu gehören auch oolithische Hüllen (totgebrannter Bentonit) und Kohlenstaub oder ähnliche Zusätze. Im Schlammstoff sind aktiver Bentonit, Kohlenstaub oder ähnliche Zusätze und totgebrannter Bindeton in Form vom Staub (allerdings nur in geringen Mengen unter 2 %) enthalten. Betriebliche Schwankungen bei diesen Anteilen sind bei modernen Technologien normalerweise ± 1 %. Sie beeinflussen aber trotzdem den Wasserbedarf des Formstoffes. Deshalb kann die Verdichtbarkeit (Befeuchtungsgrad) des Formstoffes und auch seine Zusammensetzung bezogen auf die Sand- und Schlämmstoffanteil nicht so präzise wie beim Laborsand gehalten werden. Im diesen Kapitel wird deshalb die Auswirkung der veränderlichen Verdichtbarkeit und der veränderlichen Formstoffzusammensetzung auf die zur Berechnung der Formstoffdichte im Messpunkt auf der Basis der Sensoranzeige benötigten Koeffizienten ρ'_{N} und k' untersucht. Für die Untersuchungen wurden sowohl die Laborals auch Kreislaufsande benutzt.

6.1. Einfluss der veränderlichen Verdichtbarkeit auf die Koeffizienten $\rho'_{\scriptscriptstyle N}$ und k'

Im Bild 6-1 sind die Versuchsergebnisse für zwei im Kapitel 5.4 beschriebenen Formstoffen dargestellt (Formstoff 1 mit der Verdichtbarkeit von 32,4 % und Formstoff 2 mit der Verdichtbarkeit von 50,5 %). Bei den beiden Versuchen wurden die Formstoffmassen von 100 g, wie es vorher begründet wurde (Kapitel 5.4), mit einem Pressdruck bis zu 5 MPa verdichtet. Die Sensorvorspannung wurde auf 0,7 N eingestellt. Man sieht, dass trotz ganz unterschiedlichen Verdichtbarkeitswerten bei den angewendeten Formstoffen die beiden Kurven praktisch parallel verlaufen. Das lässt die Vermutung zu, dass der Koeffizient k' von der Verdichtbarkeit des Formstoffes und von der Sensoreinstellung (Kapitel 5.2) kaum abhängig ist.

Um diese Vermutung zu bestätigen, wurden die Versuche mit dem Formstoff mit einem konstanten Schlämmstoffengehalt (7 % Bentonit IKO BOND D OE und 4 % Kohlenstaub C-Träger Probe D) bei unterschiedlichen Verdichtbarkeitswerten in den Grenzen von 28,9 bis 50,7 % durchgeführt. Es wurden vier Mischungen untersucht. Für jede Mischung wurden sieben Messungen wie zur Gewinnung der Kalibrierkurven (Kapitel 5.4) durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Bild 6-2 dargestellt. Wird das gesamte Bild analysiert, so sieht man dass sich der Koeffizient k' mit steigender Verdichtbarkeit auch etwas erhöht. Wird aber die Häufigkeit der Lage des Koeffizienten k' in ein Intervall (beispielsweise von 250 bis 260 c²/m⁴) betrachtet, so sieht man eindeutig, dass die meisten Werte unabhängig von der Verdichtbarkeit des Formstoffes in diesem Intervall liegen. Das bedeutet praktisch, dass die Wahrscheinlichkeit der Lage des Koeffizienten k' in das bezeichnete Intervall größer ist als die Wahrscheinlichkeit, dass der Koeffizient nicht in ihm liegt. Dieses Phänomen kann dadurch erklärt werden, dass sich die Dichtesteigerung und folglich die Sandbewegung im Messpunkt bei den Messungen etwas unterscheiden, obwohl die mittlere Dichte immer gleich steigt. Dadurch wird auch die Streuung des Koeffizienten k' und der Sensoranzeige bei gleicher Dichte (Kapitel 5.6) erklärt.



Bild 6-1: Abhängigkeit $ho{=}f(S)$ für unterschiedliche Formstoffe



Bild 6-2: Koeffizient $k^{'}$ bei veränderlicher Verdichtbarkeit

In dem Fall kann der Koeffizient k' als eine von der Verdichtbarkeit des Formstoffes unabhängige Größe gewertet werden. Damit müssen zur Bestimmung des Koeffizienten k' für einen Formstoff mit konstanten Schlämmstoffengehalt sieben Messungen bei der Verdichtbarkeit von 40 % nach der im Kapitel 5.4 erarbeiteten Methode zur Gewinnung der Kalibrierkurven durchgeführt und ausgewertet werden. Für die Genauigkeit der Koeffizientenbestimmung gelten in dem Fall die im Kapitel 5.6 ermittelte Werte. Der dadurch berechnete Koeffizient k' kann für die Verdichtbarkeit in den Grenzen von 30 bis 50 % konstant angenommen werden.

Aus dem Bild 6-1 geht deutlich hervor, dass sich mit steigendem Befeuchtungsgrad (mit steigender Verdichtbarkeit) die Startdichte ρ_{N} und folglich der Koeffizient $\rho_{\scriptscriptstyle N}^{'}$ verkleinern. Im Bild 6-3 sind die Versuchs- und Auswertungsergebnisse für die obenbeschriebenen Formstoffe zusammengefasst. Man sieht eindeutig, dass mit steigender Verdichtbarkeit der Unterschied zwischen $ho_{\scriptscriptstyle N}$ und $ho_{\scriptscriptstyle N}'$ größer wird. Wie es oben erwähnt wurde, ist der Koeffizient k' von der Verdichtbarkeit des Formstoffes kaum abhängig. Das bedeutet, dass sich die Kalibrierkurve im Fall der Verdichtbarkeitsänderung um die der Änderung des Koeffizienten ρ'_{N} entsprechende Größe verschiebt. Die Kalibrierkurve verläuft in dem Fall parallel zu der vorherigen Kalibrierkurve. Wird diese Verschiebung erkannt und deren Größe bestimmt, so kann die Formqualitätskontrolle unabhängig von den Verdichtbarkeitsschwankungen erfolgen, ohne den Sensor erneut zu Kalibrieren. Außerdem besteht dann die Möglichkeit, rechtzeitig auf die Schwankungen der Verdichtbarkeit zu reagieren, um die Formstoffqualität konstant zu halten. Dafür sollte eine optimale Kombination aus dem Verdichtungsregime der Formanlage und der Formstoffdosierung gefunden werden. Bei den heutigen Technologien ist es aber unmöglich, die Verdichtungsregime und die Formstoffdosierung auf der Basis der erreichten Formqualität und jeweiligen Formstoffeigenschaften zu steuern. Weiterhin wird versucht eine solche Methode zu erarbeiten.



Bild 6-3: Abhängigkeit der Startdichte und $ho_N^{'}$ von der Verdichtbarkeit



Bild 6-4: Koeffizient $k^{'}$ für unterschiedliche Formstoffe

6.2. Auswirkung des veränderlichen Schlämmstoffanteils auf die Koeffizienten k' und ρ'_{N}

Für diese Untersuchungen wurden drei Formstoffe unterschiedlicher Zusammensetzung bezüglich des Schlämmstoffanteils (Schlämmstoffanteil besteht aus dem Bentonit und Zusatzstoffen) verwendet. Außerdem war die Verdichtbarkeit der angewendeten Formstoffen auch unterschiedlich. Der Formstoff 1 wurde im Kapitel 6.1 beschrieben. Der Formstoff 2 beinhaltete 7 % Bentonit IKO BOND D OE und der Formstoff 3 beinhaltete 8 % desselben Bentonit. Beide Formstoffe enthalten keine Zusatzstoffe. Alle Messungen wurden wie zur Gewinnung der Kalibrierkurven durchgeführt. Die Mess- und Analyseergebnisse für den Koeffizienten k' sind im Bild 6-4 zusammengefasst. Man sieht, dass mit steigendem Schlämmstoffanteil auch der Koeffizient k' zunimmt. Aus dem Vergleich der Versuchsergebnissen für die Formstoffe 2 und 3 geht aber eindeutig hervor, dass, wenn sich der Schlämmstoffanteil nur wenig ändert, der Koeffizient k' konstant bleibt.

Bei den Untersuchungen der Auswirkung der veränderlichen Schlämmstoffengehalt auf den Koeffizient ρ'_{N} konnten solche eindeutigen Zusammenhänge nicht festgestellt werden. Man kann aber mit Sicherheit behaupten, dass der Koeffizient ρ'_{N} von dem Schlämmstoffengehalt in dem Sinne abhängig ist, dass, wenn bei den beiden Formstoffen die Schlämmstoffgehalte (bestehend aus den unterschiedlichen Komponenten) gleich sind, die Koeffizienten ρ'_{N} für diese Formstoffe auch unterschiedlich sein können. Wegen der sehr großen Anzahl an verschiedenartigen Zusatzstoffen und Bindetonmarken sind die "globalen" Untersuchungen nur wenig sinnvoll und sehr aufwendig. In Rahmen einer Gießerei, die ständig ein Formstoffspektrum anwendet, wären vielleicht solche Untersuchungen von Bedeutung.

Da die praktischen Schwankungen des Schlämmstoffanteils normalerweise ± 2 % betragen, haben sie folglich keine spürbare Auswirkung auf die Koeffi-
zienten k' und ρ'_{N} und folglich auf die Genauigkeit der Dichteberechnung. Falls die Änderungen des Schlämmstoffanteils größer als ± 2 % werden, können sie die Genauigkeit der Messungen negativ beeinflussen. In dem Fall muss der Sensor neu kalibriert werden. D.h. die Kalibrierkurven sollen neu aufgestellt und die Koeffizienten ρ'_{N} und k' neu berechnet werden. Deshalb sollte in der Praxis die Kalibrierkurve in einer bestimmten Taktzeit kontrolliert werden. Somit wird die Auswirkung des Schlämmstoffanteils auf die Kalibrierkurve rechtzeitig erkannt und behoben. Aus den Analyseergebnissen geht auch hervor, dass der Koeffizient k' auch für andere Formstoffe von der Verdichtbarkeit nicht abhängt (Ergebnisse für Formstoffen 2 und 3).

6.3. Bestimmung der Verschiebung der Kalibrierkurven bei Verdichtbarkeitsschwankungen

6.3.1. Sensorpositionierung zur Einschätzung der Kalibrierkurvenverschiebung

Zur Kontrolle der Formqualität sollten die Sensoren in gefährdeten Formpartien auf der Modellplatte oder direkt ins Modell installiert werden. Wie im Kapitel 5.8 beschrieben wurde, vergrößert sich das Sensorsignal im breiten Ballen mit steigender Verdichtbarkeit. Das wird auch unter Laborbedingungen bei den Versuchen am Prüfkörper beobachtet. Im engen Ballen, wo der Sensor normalerweise zur Kontrolle der Formqualität eingesetzt werden muss, ändert sich das Bild. Die Sensoranzeige vergrößert sich mit fallender Verdichtbarkeit. Deshalb kann die Verschiebung der Kalibrierkurve auf der Basis der am Modell erhaltenen Sensoranzeigen nicht stattfinden. Außerdem wird der Formstoff bei den heutigen Technologien mit einem konstanten Volumen entsprechend der Höhe des Füllrahmen nicht aber mit konstanter Masse dosiert. Infolge dessen vergrößert sich die Masse des einzufüllenden Formstoffes mit fallender Verdichtbarkeit im Form- und Füllkastenvolumen (oder in der Druckkammer bei Disamatic-Formanlagen) und umgekehrt. Wie sich diese Formstoffmasse bei einer Verdichtbarkeitsschwankung ändert und in welchem Grad diese Änderung den Einfuß auf die Sensorenanzeigen am Modell hat, hängt von vielen Faktoren ab. Zu diesen Faktoren zählen Modell- und Formkastengeometrie sowie die Formstoffbeschaffenheit.

Unter solchen Umständen ist es sinnvoll, einen solchen Platz auszusuchen, wo die Formstoffmasse und die Modellgeometrie möglichst keine spürbare Auswirkung auf die Sensoranzeige haben.

Eine derartige Stelle befindet sich am Presskolben oder an der Druckplatte bei den Disamatic-Formanlagen. Im Bild 6-5 wird die Versuchseinrichtung dargestellt, an der die im Weiteren beschriebenen Versuche durchgeführt wurden. Die Sensoren zur Erfassung der von der Sandbewegung hervorgerufenen Kräften wurden von unten und von oben im Presskolben installiert. Zur Erfassung der Formstoffdichteänderung während der Verdichtung wurde ein Wegaufnehmer wie bei den vorherigen Versuchen eingesetzt.

Im Bild 6-6 sind die Versuchsergebnisse bei der Verdichtung von drei Formstoffmassen von 100, 150 und 200 g dargestellt. Die Prüfkörper wurden mit einem konstanten Druck von 5 MPa verdichtet. Bei den Versuchen wurde eine Betriebsmischung eingesetzt. Die Verdichtbarkeit der Mischung war konstant. Man sieht, dass die Sensoranzeige unten von der zu verdichtenden Formstoffmasse bei einem konstanten Pressdruck und bei konstanter Verdichtbarkeit eindeutig abhängig ist. Je größer die Formstoffmasse ist, desto kleiner ist die Dichte und folglich die Sensoranzeige in den unteren Schichten des Prüfkörpers. Die Sensoranzeige oben ist im Gegensatz von der Formstoffmasse unabhängig geblieben, was die frühere Vermutung bestätigt. Die Sensoranzeige oben ist folglich nur von der Formstoffdichte bzw. vom Pressdruck und von der Verdichtbarkeit des Formstoffes abhängig.

6.3.2. Bestimmung der Änderung des Koeffizienten ρ'_{N} auf der Basis der Sensoranzeige bei Verdichtbarkeitsschwankungen

Aus den im vorigen Kapitel beschriebenen Versuchsergebnissen folgt, dass die Verschiebung der Kalibrierkurve bei Änderung der Verdichtbarkeit für die im Modell bzw. in der Modellplatte zur Qualitätskontrolle der Form



Bild 6-5: Versuchseinrichtung zur Gewinnung der Kalibrierkurven



Bild 6-6: Sensoranzeige am Ende der Verdichtung für die unterschiedliche Sensorpositionierung bei verschiedenen Formstoffmassen

positionierten Sensoren auf der Basis der Sensoranzeigen von dem im Presskolben bzw. in der Druckplatte installierten Sensor erfolgen kann.

Im Bild 6-7 sind die Kalibrierkurven für einen Betriebsformstoff mit einer Verdichtbarkeit von 30 und 50 % beim Anbringen des Sensors am Presskolben (Bild 6-5) dargestellt.

Angenommen, es wurde bei der Formherstellung zunächst der Formstoff mit der Verdichtbarkeit von 30 % angewendet. Zur Dichteberechnung werden in dem Fall die auf der Basis der Kalibrierkurve A_o ermittelten Koeffizienten ρ'_{No_30} und k'_{o_30} genutzt. Wird die Verdichtbarkeit von 30 auf 50 % geändert, gilt dann die Kalibrierkurve B_o zur Dichteberechnung auf der Basis der Sensoranzeige. Wenn die Form immer mit einem voreingestellten konstanten Druck P verdichtet wird, dann ist die Formstoffdichte in den oberen Formschichten (die Unterschiede sind unbedeutend klein) unabhängig von der zu verdichtenden Formstoffmenge und der Verdichtbarkeit des Formstoffes auch konstant. Diese Dichte wird als ρ_{end} weiterhin bezeichnet. Die beim Erhalten der Kalibrierkurven für den Formstoff mit der Verdichtbarkeit von 30 % ermittelte Abhängigkeit sieht folgendermaßen aus:

$$\rho = \rho'_{No_{30}} + k'_{o_{30}} \cdot S , \qquad (6.1)$$

Dann gilt am Ende der Verdichtung mit dem Druck P:

$$\rho_{end} = \rho_{No-30} + k_{o-30} \cdot S_{end}^{o-30}, \qquad (6.2)$$

wobei $S_{end}^{o_{-30}}$ das Sensorsignal beim Pressdruck P (am Ende des Verdichtens) ist. Für die Verdichtbarkeit von 50 % wird die Gleichung 6.1 folgend geändert:

$$\rho = \rho_{No-50} + k_{o_-50} \cdot S , \qquad (6.3)$$

Dann gilt am Ende der Verdichtung mit dem Druck P:

$$\rho_{end} = \rho'_{No-50} + k'_{o-50} \cdot S^{o-50}_{end}, \qquad (6.4)$$

wobei $S_{e\bar{n}d}^{o}$ das Sensorsignal beim Pressdruck P (am Ende des Verdichtens) ist. Wie es im Kapitel 6.1 begründet wurde, ist der Koeffizient k' von der Verdichtbarkeit des Formstoffes unabhängig. Dann gilt

$$\dot{k}_{o_{-}30} = \dot{k}_{o_{-}50}$$
, (6.5)



Bild 6-7: Kalibrierkurven bei der Sensorpositionierung im Presskolben



Bild 6-8: Kalibrierkurven bei der Sensorpositionierung im Modell

Da ρ_{end} bekannt ist, kann der Koeffizient $\rho'_{No_{-}50}$ berechnet werden, ohne den Sensor am Presskolben erneut zu Kalibrieren:

$$\rho'_{No_{50}} = \rho_{end} - k'_{o_{50}} \cdot S^{o_{50}}_{end} = \rho_{end} - k'_{o_{30}} \cdot S^{o_{50}}_{end}$$
, (6.6)
Somit wird die Größe des Verschiebens der Kalibrierkurve für den am
Presskolben installierten Sensor festgestellt.

Wie oben erwähnt wurde, hängt die Sensoranzeige in den unteren Formpartien von der Ballenschwierigkeit und außerdem von der zu verdichtenden Formstoffmasse ab. Deshalb verändert sich die Sensoranzeige mit der Verdichtbarkeitsänderung nicht so wie beim Kalibrieren der Sensoren. Aus diesem Grund kann die Verschiebung der Kalibrierkurven auf der Basis der Sensoranzeigen von den am Modell bzw. am Modellplatte installierten Sensoren nicht stattfinden. Es besteht aber die Möglichkeit diese Verschiebung auf der Basis der Sensoranzeige des im Presskolben platzierten Sensors zu ermitteln.

Im Bild 6-8 ist die Verschiebung der Kalibrierkurven für den Betriebsformstoff bei der Änderung der Verdichtbarkeit von 30 auf 50 % gezeigt. Der Sensor stand im unteren Kolben (Bild 6-5). Aus dem Vergleich der in den Bilder 6-7 und 6-8 dargestellten Kalibrierkurven bei der Sensorpositionierung oben und unten folgt eindeutig, dass die Kalibrierkurven für diese Sensorpositionen nicht gleich sind. Das erfolgt vor allem dadurch, dass sich die Formstoffbewegung in den oberen und unteren Schichten des Prüfkörpers und außerdem die Dichtesteigerung in den Messpunkten währen des Verdichtens unterscheiden. So wird zum Beispiel die Startdichte in den oberen Schichten früher als in den unteren erreicht. Mit dem Wegaufnehmer kann aber nur die mittlere Dichte des Prüfkörpers ermittelt werden (zumindest im Dichtebereich bis 1380 g/m³). Deshalb sieht es so aus, als wenn die Startdichte in den oberen Schichten kleiner als in unteren bei gleichem Formstoff ist. Deshalb müssen die Sensoren für die Installation am Presskolben und zur Qualitätskontrolle getrennt kalibriert werden. Man sieht aber, dass trotz dieser Unterschiede der Verlauf der Kurven ähnlich ist und sich bei der Verdichtbarkeitsänderung die Kurven um einen fast gleichen Betrag verschieben. Wird diese Verschiebung für die am Modell installierten Sensoren festgestellt, so kann der Formqualitätsprüfung in den unteren Formpartien unabhängig von der Verdichtbarkeitsschwankungen kontinuierlich erfolgen.

Angenommen wie früher, dass zuerst mit dem Formstoff mit der Verdichtbarkeit von 30 % gearbeitet wird. Zur Dichteberechnung werden in dem Fall die auf der Basis der Kalibrierkurve A_u ermittelten Koeffizienten ρ'_{Nu_30} und k'_{u_30} verwendet. Wird die Verdichtbarkeit von 30 auf 50 % geändert, gilt dann die Kalibrierkurve B_u zur Dichteberechnung auf der Basis der Sensoranzeige. Beim Verdichten mit einem konstanten Druck P wird die Form am Modell und an der Modellplatte bei der Änderung der Verdichtbarkeit aus oben genannten Gründen nicht gleich verdichtet. Dass bedeutet, dass die Enddichte ρ_{end} im Messpunkt in unteren Formpartien im Gegensatz zu den oberen von der Verdichtbarkeit des Formstoffes abhängt. Deshalb muss zur Bestimmung der Kurvenverschiebung nicht der am Ende des Verdichtens am Modell gemessene sondern das der Enddichte ρ_{end} entsprechende Sensorsignal verwendet werden. Dafür muss der Unterschied $S_{end}^{u_30} - S_{end}^{u_30}$ bekannt sein.

Zur Bestimmung dieses Unterschiedes verschiebt man die Kalibrierkurve A_o (Bild 6-7) für den oberen Sensor so, dass der Punkt B' im Punkt B liegt (Bild 6-9). Man sieht, dass in dem Fall die Kalibrierkurven A_u und A_o den Winkel β bilden. Es steht außerdem fest, dass im Allgemeinen folgendes Verhältnis gilt:

$$S_{end}^{o} - S_{end}^{o} \neq S_{end}^{u} \neq S_{end}^{u} - S_{end}^{u},$$
(6.7)

Wird die Kalibrierkurve A_o um den Winkel β gedreht, so dass die Kurven A_u und A_o aufeinander liegen, so sieht man, dass die Kalibrierkurven B_u und B_o auch aufeinander liegen. Der Unterschied besteht darin, dass die Punkte F und F' nicht übereinstimmen.

Zum Berechnen des Unterschiedes $S_{end}^{u_{50}} - S_{end}^{u_{30}}$ werden zwei Dreiecke ABC und BFF' betrachtet. Für diese Dreiecke gelten folgende Verhältnisse:

$$\alpha = \alpha', \ \beta = \beta', \ \gamma = \gamma', \tag{6.8}$$

Um diese Winkel zu bestimmen, müssen zuerst die Strecken AB = c, BC = a und CA= b berechnet werden. Diese Strecken können nach folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$a = \sqrt{\left(S_{end}^{u_{-30}} - S_{c}\right)^{2} + \left(\rho_{end} - \rho'_{Nu_{-30}}\right)^{2}}, \qquad (6.9)$$
$$b = S_{c};$$

$$c = \sqrt{\left(S_{end}^{u_{-30}}\right)^2 + \left(\rho_{end} - \rho'_{Nu_{-30}}\right)^2}, \qquad (6.10)$$

Damit die Sensoranzeige- und Dichtegrößen vergleichbar werden, wird die Dichte für alle weitere Berechnungen in g/cm³ eingesetzt. Das Sensorsignal wird in N definiert. Deshalb sollen die auf der Basis der Kalibrierkurven ermittelte Koeffizienten k' und ρ'_{N} für die weiteren Berechnungen mit 0,001 multipliziert werden. Weiterhin gelten folgende Gleichungen:

$$\dot{k}_{o_{-}30} = \dot{k}_{o_{-}50} = \dot{k}_{o}$$
, (6.11)

$$\dot{k}_{u_{30}} = \dot{k}_{u_{50}} = \dot{k}_{u}$$
, (6.12)

$$\rho_{end} = \rho'_{Nu_{30}} + k'_{u} \cdot S^{u_{30}}_{end}, \qquad (6.13)$$

$$S_{c} = S_{end}^{u_{-30}} \cdot \frac{k_{o} - k_{u}}{k_{o}}, \qquad (6.14)$$

Dann sehen die Gleichungen 6-10 bis 6-12 folgend aus:

$$a = S_{end}^{u_{-30}} \sqrt{k_{u}^{'2} + \left(1 - \frac{k_{o}^{'} - k_{u}^{'}}{k_{o}^{'}}\right)^{2}},$$
(6.15)

$$b = S_{end}^{u_{-}30} \cdot \frac{k_{o}' - k_{u}'}{k_{o}'}, \qquad (6.16)$$

$$c = S_{end}^{u_{-}30} \sqrt{1 + k_{u}^{'2}} , \qquad (6.17)$$

Danach ergeben sich die Winkel α , β und γ aus folgenden Gleichungen:

$$\alpha = \operatorname{Arccos}((b^2 + c^2 - a^2)/(2bc)), \tag{6.18}$$

$$\beta = \operatorname{Arccos}((c^2 + a^2 - b^2)/(2ca)), \tag{6.19}$$

$$\gamma = \operatorname{Arccos}((a^2+b^2-c^2)/(2ab)),$$
 (6.20)

Danach kann die Größe des Unterschiedes $S_{end}^{u_{-}50} - S_{end}^{u_{-}30}$ aus dem Rechteck BF? berechnet werden. Die Strecke BF? lässt sich wie folgt definieren:

$$BF' = a' = S_{end}^{o-50} - S_{end}^{o-30}, \qquad (6.21)$$



Bild 6-9: Bestimmung der Kurvenverschiebung bei der Verdichtbarkeitsänderung von 30 auf 50% für den Testformstoff

Dann ist der Unterschied $S_{end}^{u_{50}} - S_{end}^{u_{30}}$ folgend zu berechnen:

$$BF = c' = (S_{end}^{o} - S_{end}^{o}) \sqrt{1 - 2\cos\gamma \frac{\sin\beta}{\sin\alpha} + \frac{\sin^2\beta}{\sin^2\alpha}}, \qquad (6.22)$$

Das Sollsensorsignal $S_{end}^{u_{-50}}$ für den unten positionierten Sensor bei der Formstoffdichte ρ_{end} und folglich der Koeffizient $\rho'_{Nu_{-50}}$ bei der Verdichtbarkeitsänderung von 30 auf 50 % können danach auf der Basis der Kalibrierkurven für die oben und unten positionierten Sensoren bei der Verdichtbarkeit von 30 % und des direkt an der Form gemessenen Sensorsignals vom oberen Sensor bei der Verdichtbarkeit von 50 % wie folgt berechnet werden:

$$S_{end}^{u=50} = S_{end}^{u=30} + (S_{end}^{o=50} - S_{end}^{o=30}) \sqrt{1 - 2\cos\gamma \frac{\sin\beta}{\sin\alpha} + \frac{\sin^2\beta}{\sin^2\alpha}},$$
 (6.23)

$$\rho'_{Nu_{50}} = \rho_{end} - k'_{u} \cdot S^{u_{50}}_{end}, \qquad (6.24)$$

In diesem Beispiel wurde als Enddichte ρ_{end} , die beim Kalibrieren der Sensoren erreichte Dichte am Ende des Verdichtens genommen. In der Praxis sollte als Enddichte die am Presskolben direkt an der Form erreichte Dichtewert (Messung mit oberem Sensor) dienen.

Auf Grund dieser Berechnungen kann die Größe der Verschiebung der Kalibrierkurven bei der Verdichtbarkeitsänderung von 30 auf 50 % für den angewendeten Betriebsformstoff bestimmt werden.

Angenommen, dass mit irgendeinem Formstoff mit der Verdichtbarkeit von VD1 gearbeitet wird. Zur Berechnung der Formstoffdichte am Modell oder an der Modellplatte und am Formrücken werden die Sensoren für die Installation am Presskolben oder an der Druckplatte, wie im Kapitel 5 beschrieben, kalibriert. Dafür ist es nicht erforderlich die Sensoren auf einem Prüfstand (Bild 6-5) zu Kalibrieren und danach ins Modell oder in die Presskolben zu montieren. Da die Sensoreinstellung, die Federrate und die Fühlerabmessungen immer konstant bleiben, können auf dem Prüfstand nur zwei Sensoren zum Erhalten der Kalibrierkurven eingesetzt werden. Die Sensoren zur Qualitätskontrolle direkt an der Form werden durch die Datenübertragung zwischen Prüfstand und Anlage automatisch für den angewendeten Formstoff kalibriert. Nach dem Kalibrieren mit entsprechenden Berechnungen werden die

Koeffizienten k_o' und $\rho'_{_{No} \ VD1}$ für den am Pressorgan installierten Sensor sowie k_{u}' und $\rho'_{Nu VD1}$ für die Sensoren zur Qualitätskontrolle in gefährdeten Formpartien festgestellt und an die Anlage weitergegeben. Bei der Produktion der ersten Form wird der dem Verdichtungsdruck und der Formstoffbeschaffenheit entsprechende Sensorsignal $S_{end}^{o_{-}VD1}$ und die diesem Signal entsprechende Dichte $\rho_{\scriptscriptstyle end}$ am Formrücken festgestellt. Dabei werden in gefährdeten Formpartien kleinere Dichtewerte erreicht, die von den in gefährdeten Plätzen installierten Sensoren erfasst werden. Auf der Basis der Kalibrierkurven wird das Sensorsignal Sund für die Sensoren zur Qualitätskontrolle berechnet, bei dem die Dichte $\rho_{\scriptscriptstyle end}$ erreicht werden würde. Diese Daten werden in Datenerfassungs- und Bearbeitungsprogramm zur Qualitätskontrolle der Form gespeichert. Während mit den auf der Basis der Sensoranzeigen von den in gefährdeten Formpartien installierten Sensoren umgerechneten Dichtewerten die eigentliche Qualitätskontrolle der Form bei der weiteren Produktion stattfindet, wird mit dem am Pressorgan angebrachten Sensor nicht nur die Dichte am Formrücken sondern auch die Formstoffbeschaffenheit bzw. Verdichtbarkeit kontrolliert. Ist die Verdichtbarkeit konstant, so bleiben auch die Sensoranzeige von diesem Sensor und die auf deren Basis ermittelte Dichte konstant. Wenn sich die Verdichtbarkeit des Formstoffes aus irgendwelchen Gründen auf den Wert VD2 ändert, bleibt am Ende der Verdichtung die Formstoffdichte $\rho_{_{end}}$ in oberen Formschichten konstant. Das Sensorsignal von den an dem Pressorgane angebrachten Sensor verändert sich in Übereinstimmung mit der Verdichtbarkeitsänderung auf $S_{end}^{o_{-}VD2}$. Durch den Vergleich mit dem Sensorsignal $S_{end}^{o_{-}VD1}$ wird die Änderung der Verdichtbarkeit rechtzeitig erkannt. Der Koeffizient $\rho'_{N_0 - VD2}$ wird nach der Gleichung (6.25) berechnet und damit die der Verdichtbarkeit von VD 2 entsprechende Verschiebung der Kalibrierkurve für den Sensor festgestellt.

$$\rho'_{No \ VD2} = \rho_{end} - k_o \cdot S_{end}^{o-VD2}, \qquad (6.26)$$

Danach wird die Verschiebung der Kalibrierkurve für die im Modell bzw. in der Modellplatte platzierten Sensoren nach folgenden Gleichungen ermittelt.

$$S_{end}^{u_{-}VD2} = S_{end}^{u_{-}VD1} + (S_{end}^{o_{-}VD2} - S_{end}^{o_{-}VD1}) \sqrt{1 - 2\cos\gamma \frac{\sin\beta}{\sin\alpha} + \frac{\sin^{2}\beta}{\sin^{2}\alpha}}, \quad (6.27)$$

$$\rho_{Nu_VD2} = \rho_{end} - k_u \cdot S_{end}^{u_VD2}, \qquad (6.28)$$

wobei gelten:

$$\alpha = \operatorname{Arccos}((b^2 + c^2 - a^2)/(2bc)), \tag{6.29}$$

$$\beta = \operatorname{Arccos}((c^2 + a^2 - b^2)/(2ca)), \tag{6.30}$$

$$\gamma = \operatorname{Arccos}((a^2+b^2-c^2)/(2ab)),$$
 (6.31)

$$a = S_{end}^{u_{-}VD1} \sqrt{k_{u}^{'2} + \left(1 - \frac{k_{o}^{'} - k_{u}^{'}}{k_{o}^{'}}\right)^{2}},$$
(6.32)

$$b = S_{end}^{u_{VD1}} \cdot \frac{k_o - k_u}{k_o},$$
(6.33)

$$c = S_{end}^{u_{-}VD1} \sqrt{1 + k_{u}^{'2}} , \qquad (6.34)$$

Danach sollen die Dichtewerte in gefährdeten Formpartien unter Berücksichtigung der Verdichtbarkeitsänderung berechnet und mit Sollwerten und für diesen Werten angegebenen Toleranzen verglichen werden. Liegen sie im zulässigen Intervall, kann die Produktion weiter folgen. Wenn sie aber außer-halb diesen Grenzen liegen, dann sollen die Änderungen beim Verdichtungsregime und wahrscheinlich bei der Formstoffdosierung vorgenommen werden. Die neuen Daten werden im Bearbeitungsprogramm gespeichert. Das zulässige Intervall für die Schwankungen der Formstoffdichte muss von den Technologen unter Berücksichtigung der Sensorgenauigkeit (der Intervall darf nicht kleiner als Genauigkeitsintervall des Sensors sein) festgelegt werden.

Die oben beschriebene Methode zur Qualitätskontrolle der Form unter Berücksichtigung der Verdichtbarkeitsschwankungen gilt aber nur für die Formmaschinen, die ein Pressorgan haben, wo der Sensor zur Kontrolle der Formstoffbeschaffenheit installiert werden kann. Zu diesen gehören die Formmaschinen, die mit der Verdichtungsweisen Pressen oder Luftstrompressen arbeiten. Bei der Impulsverdichtung ist diese Methode nicht einsetzbar. Deshalb müssen die Sensoren bei erheblichen Verdichtbarkeitsschwankungen $\geq \pm 2$ % immer erneut kalibriert werden.

6.4. Konsequenzen

Die in dem Kapitel 6 beschriebene Untersuchungsergebnisse lassen folgende Konsequenzen zu:

- der Koeffizient ρ'_{N} verändert sich proportional zu den Verdichtbarkeitsänderungen. Der Koeffizient k' ist im Gegensatz von der Verdichtbarkeit des jeweiligen Formstoffes unabhängig;
- die beiden Koeffizienten ρ'_{N} und k' hängen vom Schlämmstoffgehalt des Formstoffes ab. Die betrieblichen Schwankungen des Schlämmstoffgehaltes haben keine spürbare Auswirkung auf die Koeffizienten. Bei den Schwankungen, die größer als ± 2 % sind, müssen die Sensoren erneut kalibriert werden;
- bei den mit einem Pressorgan ausgestatteten Formmaschinen ist es möglich, mittels eines in die Pressplatte zu installierenden Sensors den Einfluss der Verdichtbarkeitsschwankungen auf die Kalibrierkurven für die Formqualität kontrollierenden Sensoren im Lauf der Produktion festzustellen, ohne dass die Sensoren erneut kalibriert werden müssen.

7. Praktische Überprüfung der erarbeiteten Messvorrichtungen sowie Eich- und Berechnungsmethoden

7.1. Erste praktische Versuche

Die vorher vorgeschlagenen Methoden zur Gewinnung der Kalibrierkurve und zur Berechnung der Formstoffdichte im Messpunkt auf der Basis der Sensoranzeige sollten unter praktischen Bedingungen an einer Gießform geprüft werden. Ziel dieser Untersuchungen war es, die Funktionstüchtigkeit des neuen Sensors und der entwickelten Berechnungsmethoden nicht nur im Labor, sondern an einer realen Form zu prüfen.

Speziell für diese Versuche wurde ein Kammmodell entwickelt und zusammengebaut (Bild 7-1). Das Modell wurde so gebaut, dass die Formballen ein unterschiedliches Verhältnis Ballenhöhe/Ballenbreite haben. Dieses Verhältnis für die Ballen zwischen Modellteilen 2, 3, 4 beträgt $3\div1$ und für die Ballen zwischen Teilen 1-2 sowie 4-5 $1\div1$.

Die Versuche wurden mit dem Einsatz von zwei Sensoren durchgeführt. Der Sensor 1 wurde in die Mitte zwischen den Teilen 2 und 3 installiert (Messpunkt 1). Der Sensor 2 wurde in die Mitte zwischen den Modellteilen 1 und 2 gestellt (Messpunkt 2). Die entsprechenden Abmessungen sind im Bild 5-20 dargestellt. Bei den Versuchen wurde der Formstoff mit dem Bentonitgehalt von 8 %, Wassergehalt von 2 % und mit der Verdichtbarkeit von 35 % angewendet. Die Sensorvorspannung betrug für beide Sensoren 0,7 N. Die Kalibrierkurven wurden für jeden Sensor getrennt nach der im Kapitel 5.4 beschriebenen Methode mit der Benutzung der dafür benötigten Mess- und Rechentechnik gewonnen. Danach wurden die Koeffizienten ρ'_{N} und k' mit Hilfe einer PC – Anwendung ermittelt (Tabelle 7-1). Der geringe Unterschied zwischen den Koeffizienten k' für die beiden Sensoren wird durch die Ungenauigkeit bei der Sensorenfertigung erklärt.



Bild 7-1: Kammmodell

	$ ho_{\scriptscriptstyle N}^{'}$, kg/m³	<i>k</i> ′, c²/m⁴
Sensor 1	1335	236
Sensor 2	1335	243

Diese Koeffizienten wurden in einer PC-Anwendung zur Datenerfassung und Bearbeitung automatisch nach der Bearbeitung eingegeben, so dass bei der Messungen an der Form die Sensorsignale sofort nach der Erfassung in die Dichtewerte umgerechnet und gespeichert wurden.

Die Messergebnisse sind im Bild 7-2 gezeigt. Auf dem Bild ist deutlich zu sehen, dass die Startdichte im Messpunkt 2 wesentlich früher als im Punkt 1 erreicht wurde. Dies ist durch die unterschiedlichen Verhältnisse Ballenhöhe/Ballenbreite für die entsprechenden Formballen zu erklären. Zunächst wurde die Form mit einem Pressdruck bis zu 1 MPa (Bereich I) verdichtet. Die Drucksteigerung war konstant. Dann wurde der Formstoff entlastet (Punkt 1). Im Messpunkt 2 wird dabei eine Formstoffrückfederung beobachtet. Die Dichte im Messpunkt 1 ist zu dem Zeitpunkt noch zu klein, deshalb tritt in diesem Messpunkt keine Rückfederung ein. Danach wurde der Pressdruck von 1 MPa wieder eingestellt und etwas gehalten (Bereich II), bevor die Form weiter verdichtet wurde. Im Bereichen III und IV wurde der Formstoff mit einer veränderlichen Pressdrucksteigerung (zunächst schneller dann langsamer) bis 1,5 MPa verdichtet. Dann wurde noch eine Pause eingehalten (Bereich V) und sehr langsam bis zu einem Druck von 2 MPa verdichtet. Danach wurde der Formstoff entgültig entlastet (Punkt 2). Man sieht, dass die Rückfederung des Formstoffes im Messpunkt 2 im Vergleich zu der Rückfederung im Punkt 1 (Bild 7-2) größer geworden ist. Im Messpunkt 1 wurde keine Rückfederung festgestellt, da die erreichte Formstoffdichte noch immer zu klein für die Rückfederung war. Der Endzustand der Form in den Messpunkten 1 und 2 stellt der Bereich VII dar. Die mittlere Dichte der Form betrug am Ende des Verdichtungsvorganges ca. 1600 kg/m³. Die mittlere Dichte und die Dichte in den beiden Messpunkten liegen entsprechend den theoretischen Vorstellungen und praktischen Erfahrungen zueinander.

Taballa 7 4



Bild 7-2: Dichtemessung direkt an der Form in Messpunkten 1 und 2

Aus den Messergebnissen geht deutlich hervor, dass die neu entwickelten Sensoren sogar unter schwierigen formstofftechnologischen Bedingungen (Formstoffverdichtbarkeit betrug bei dem Versuch nur 35 %) und an sehr schwer verdichtbaren Stellen der Form (Messpunkt 1) funktionstüchtig sind. Wie oben erwähnt wurde, entsprechen die auf der Basis der Sensoranzeigen berechnete Formstoffdichtewerte i den Messpunkten der Theorie und Praxis. Dies bedeutet, dass sowohl die Methode zur Gewinnung der Kalibrierkurven und folglich der Koeffizienten ρ'_N und k' als auch die Sensoreinstellung auf 0,7 N richtig ausgewählt wurden.

7.2. Prüfung der ausgewählten Messweise und Methode zur Gewinnung der Kalibrierkurven.

Die vorher vorgeschlagene Methode zum Berechnen der Formstoffdichte im Messpunkt auf der Basis der Sensoranzeige ist nur in dem Fall gültig, wenn bei gleichen Sensoranzeigen die Dichte des Prüfkörpers (bei der Messung

89

zur Gewinnung der Kalibrierkurven) und die Dichte im Formballen ebenfalls im Messpunkt (Messung direkt an der Form) gleich sind. Nur dann sind die am Prüfkörper ermittelten Kalibrierkurven auf die praktischen Bedingungen übertragbar. Um dies zu prüfen, muss die Sensoranzeige an der Form während des Verdichtens bis zur Presseentlastung aufgenommen und danach die "wahre" Dichte (nicht die mittlere Dichte der Form) im Messpunkt oder in unmittelbarer Nähe des Messpunkt ermittelt werden. Danach muss ein Prüfkörper im Labor wie zur Gewinnung der Kalibrierkurven so lange verdichtet werden, bis die Sensoranzeige am Prüfkörper mit der Sensoranzeige an der Form gleich ist. Danach muss die "wahre" Dichte im Messpunkt am Prüfkörper ermittelt und mit der "wahren" Dichte an der Form verglichen werden. Sind die Dichten gleich, dann können die am Prüfkörper ermittelten Kalibrierkurven zum Berechnen der Dichte auf der Basis der Sensoranzeige für die Messungen direkt an der Form benutzt werden. Diese Prüfmethode ist aber in der Praxis kaum zu verwirklichen. Die Schwierigkeit besteht vor allem darin, dass sich die "wahre" Dichte im Messpunkt besonders an der Form von der mittleren Dichte sehr stark unterscheiden kann. Dieses Unterschied hängt von der Ballenschwierigkeit und Formstoffbeschaffenheit ab. Deshalb kann die "wahre" Dichte an der Form nur mit Hilfe der Tomographie bestimmt werden. Diese Versuche sind aber wegen der Formgröße und Messbedingungen kaum möglich. Diese Messungen sind außerdem teuer und kompliziert.

Wenn zur Bestimmung der "wahren" Dichte im Messpunkt ein bestimmtes Formstoffvolumen ausgeschnitten und danach gewogen wird, dann soll dieses Volumen schon erheblich groß sein, damit die Genauigkeit der Messung groß genug sein kann. Die praktische Erfahrung zeigt, dass diese Methode entweder eine sehr große Ungenauigkeit hat, oder das auszuschneidende Volumen zu groß sein muss, was zum Messen der mittleren nicht aber der benötigten Dichte im Messpunkt führt.

Deshalb wurde eine wesentlich einfachere und sichere Methode angewendet. Zunächst wurde die Form unter betrieblichen Bedingungen gefertigt (Verdichtungsverfahren Pressen). Dafür wurde das Kammmodell wie im Bild 7-1 eingesetzt. Dabei wurden die Sensoranzeigen im Messpunkten 1 und 2 erfasst und gespeichert. Nach dem Verdichten wurde die Formhärte und die Formfestigkeit in unmittelbarer Nähe von den Messpunkten 1 und 2 gemessen. Dann wurde eine Formstoffmenge von 100 g (desselben Formstoffs) im Labor wie zur Gewinnung der Kalibrierkurven so lange verdichtet, bis die direkt an der Form gemessenen maximalen Sensoranzeigen erreicht wurden. Danach wurden die Formhärte und Formfestigkeit am Prüfkörpern gemessen und mit Messergebnissen der Form verglichen.

Derartige Versuche wurden für zwei Formstoffe durchgeführt. Der erste Formstoff stellt eine Betriebsmischung (weiter Formstoff 1 genannt) dar. Der zweite Formstoff ist eine Labormischung (Formstoff 2). Aus jedem Formstoff wurden zwei Mischungen mit unterschiedlicher Verdichtbarkeit aufbereitet. Die Formstoffzusammensetzungen und entsprechende Verdichtbarkeitswerten sind in der Tabelle 7-2 zusammengefasst. Für die Betriebsmischung sind die Angaben für Bentonitgehalt bezogen auf IKO-BOND D.

Bei jedem Versuch wurde eine Formstoffmenge von 19 kg mit einem Pressdruck von 1,41 MPa verdichtet. Die Verdichtungsgeschwindigkeit war bei den Versuchen nicht konstant. Die Messergebnisse für die Formstoffe 1.1 und 1.2 sind im Bild 7-3 und für die Formstoffe 2.1 und 2.2 im Bild 7-4 Danach wurden die Kalibrierkurven nach oben zusammengefasst. beschriebener Methode gewonnen und die Dichtewerte auf der Basis der Sensoranzeigen umgerechnet. Die Ergebnisse für die Formstoffe 1 und 2 sind entsprechend in den Bilder 7-5 und 7-6 dargestellt. Die Messergebnisse für die Formhärte

Tabelle 7-2

	Formstoff 1		Formstoff 2		
	Formstoff 1.1	Formstoff 1.2	Formstoff 2.1	Formstoff 2.2	
Verdichtbarkeit	30 %	53 %	30 %	50 %	
Quarzsand	-		H 32		
Bentonit	-		IKO-BOND D		
Sandgehalt	92,1 %		93 %		
Bentonitgehalt	7,9 %		7 %		
Schlammstoffengehalt	11,47 %		-		
Oolithisierungsgrad	5,16 %		-		



Bild 7-3: Sensoranzeige beim Verdichten der Betriebsmischung



- Messpunkt_1 VD 30 - Messpunkt_2 VD 30 - Messpunkt_1 VD 50 - Messpunkt_2 VD 50

Bild 7-4: Sensoranzeige beim Verdichten der Labormischung



Bild 7-5: Dichtesteigerung bei der Verdichtung von der Betriebsmischung



- Messpunkt_1 VD 30 - Messpunkt_2 VD 30 - Messpunkt_1 VD 50 - Messpunkt_2 VD 50

Bild 7-6: Dichtesteigerung bei der Verdichtung von der Labormischung

93

Formstoff 1.1						
M	essunger	n an der I	Form			
	N	lesspunkt	1	N	lesspunkt	2
Max. Sensorsignal, N		0,473			0,868	
Max. Dichte, kg/m ³ (umgerechnet)		1466			1586	
Formfestigkeit	3,9	3,4	3,5	13,5	13,4	13,6
Formhärte	79	81	79	92	91	92
Me	ssungen	am Prüfk	körper			
Sensorsignal, N	0,473 0,868					
Pressdruck, MPa	0,21 1,06					
Prüfkörperdichte, kg/m ³ (nach	1468 1596					
Wegaufnehmeranzeige)						
Formfestigkeit	3,4	3,3	3,5	13,8	13,5	13,4
Formhärte	79	79	79	92	90	91
Formstoff 1.2						
Me	essunger	n an der F	Form			
	N	lesspunkt	1	N	lesspunkt	2
Max. Sensorsignal, N		0,375			1,155	
Max. Dichte, kg/m ³ (umgerechnet)		1337			1565	
Formfestigkeit	2,0	2,1	1,7	13,2	13,2	13,0
Formhärte	59	62	64	90	89	90
Me	ssungen	am Prüfk	körper			
Sensorsignal, N		0,375 1,155				
Pressdruck, MPa		0,07			0,83	
Prüfkörperdichte, kg/m ³ (nach		1354			1570	
Wegaufnehmeranzeige)						
Formfestigkeit	2,1	2,0	1,8	13,1	13,2	13,0
Formhärte	63	64	61	89	90	90
Formstoff 2.1						
M	essunger	n an der F	Form			
	N	lesspunkt	1	N	lesspunkt	2
Max. Sensorsignal, N	0,308 0,78		0,78			
Max. Dichte, kg/m ³ (umgerechnet)		1481			1617	
Formfestigkeit	3,1	3,0	2,7	10,4	10,4	10,4
Formhärte	58	59	60	88	89	90
Me	ssungen	am Prüfk	körper			
Sensorsignal, N		0,308			0,78	
Pressdruck, MPa		0,11			0,75	
Prüfkörperdichte, kg/m ³ (nach		1480			1617	
Wegaufnehmeranzeige)					1	
Formfestigkeit	2,8	2,8	3,0	10,2	10,5	10,3
Formhärte	58	62	59	88	88	89
Formstoff 2.2						
Me	essunger	n an der F	Form			
	N	lesspunkt	1	N	lesspunkt	2
Max. Sensorsignal, N	0,293 0,824					
Max. Dichte, kg/m ³ (umgerechnet)		1421			1574	
Formfestigkeit	2,1	2,0	1,7	9,4	10,1	9,8
Formhärte	52	53	52	87	88	87
Me	ssungen	am Prüfk	körper			
Sensorsignal, N		0,293			0,824	
Pressdruck, MPa	0,06 0,49					
Prüfkörperdichte, kg/m³ (nach	1410 1568					
Wegaufnehmeranzeige)					1	
Formfestigkeit	2,0	2,0	2,0	9,5	10,0	9,8
Formhärte	51	52	52	87	89	88

und Formfestigkeit sind in der Tabelle 7-3 zusammengefasst. Aus der Analyse der Sensoranzeigen in den Messpunkten 1 und 2 sieht man, dass in dem Messpunkt 2 die Sensoranzeigen bei den Formstoffen mit größerer Verdichtbarkeit auch größer als die Sensoranzeigen bei der kleineren Verdichtbarkeit sind. Das resultiert daraus, dass sich die Startdichte und folglich der Koeffizient ρ'_{N} mit steigender Verdichtbarkeit verkleinern (Bild 5-7 Kapitel 5). Ähnliche Ergebnisse bekommt man im Labor, wo beim Formstoffeinfüllen das Verhältnis Ballenbreite/Ballenhöhe keine Auswirkung auf die Schüttverhältnisse hat. Das Bild ändert sich im Messpunkt 1. Die Sensoranzeigen bei den Formstoffen mit der kleineren Verdichtbarkeit sind am Ende der Verdichtung größer als bei den Formstoffen mit der größeren Verdichtbarkeit. Das erfolgt dadurch, dass sich das Schüttgewicht des Formstoffes Ballen beim Sandfüllvorgang in engen mit fallender Verdichtbarkeit vergrößert. Im Labor wird auch ein solches Bild beobachtet. Aber mit der Verkleinerung des Verhältnisses Ballenbreite/Ballenhöhe wird der Unterschied zwischen dem Schüttgewicht beim Einfüllen von den Formstoffen mit größerer Verdichtbarkeit und dem Schüttgewicht beim Füllvorgang von den Formstoffen mit der kleineren Verdichtbarkeit erheblich größer. Das Schüttgewicht in engen und breiten Ballen unterscheidet sich außerdem mit abnehmender Verdichtbarkeit weniger [13]. Deshalb wird die dem Formstoff entsprechende Startdichte im Messpunkt 1 bei den Formstoffen mit der Verdichtbarkeit von 30 % wesentlich früher (im Bezug auf Pressdrucksteigerung) als bei den Formstoffen mit der Verdichtbarkeit von 50 % erreicht. In der Tabelle 7-3 sind die Pressdrücke, die beim Verdichten der Prüfkörper zum Erreichen der direkt an der Form gemessenen Sensoranzeigen geleistet wurden, dargestellt.

Man sieht deutlich, dass diese Drücke bei den Formstoffen mit der kleineren Verdichtbarkeit größer als bei der größeren Verdichtbarkeit sind. Das wird sowohl im breiten als auch im engen Ballen beobachtet. Das heißt, dass mit fallender Verdichtbarkeit eine größere Energiemenge zum Verdichten des Formstoffes an die Modellplatte übertragen wird. Weil das Schüttgewicht des Formstoffes am Anfang des Verdichtens bei den Formstoffen mit geringerer Verdichtbarkeit zunimmt und die Energiemenge zum Verdichten des Sandes an der Modellplatte größer wird, erhält man bei gleicher Formstoffmasse und beim gleichen Pressdruck die größere Dichte an der Modellplatte bei den Formstoffen mit kleinerer Verdichtbarkeit. Die Größe dieses Unterschiedes hängt von der Ballenschwierigkeit ab.

Analysiert man die Dichtesteigerung in den Messpunkten 1 und 2, so sieht man, dass sich die erreichten Dichtewerte im Messpunkt 2 am Ende des Verdichtens der Formstoffen mit der Verdichtbarkeit von 30 und 50 % nicht so groß wie im Messpunkt 1 unterschieden. Deshalb ist der Unterschied zwischen Formhärte- und Formfestigkeitswerten in den breiten Ballen auch wesentlich kleiner. Werden die Unterschiede zwischen der erreichten Dichtewerten in den Messpunkten 1 und 2 bei der Verdichtbarkeit von 30 und 50 % analysiert, so sieht man auch, dass diese Unterschiede mit der fallenden Verdichtbarkeit auch kleiner werden. Besonders gut kann man das beim Formstoff 1 (Betriebsformstoff) beobachten. Das heißt, das die Form bei der Verdichtbarkeit von 30 % gleichmäßiger verdichtet wurde.

Aus der in der Tabelle 7-3 dargestellten Ergebnissen geht deutlich hervor, dass beim Erreichen der gleichen Sensorsignale an der Form und am Prüfkörper die Formhärte- und Formfestigkeitswerte für jeden untersuchten Formstoff praktisch gleich sind. Das bedeutet, dass zum Erreichen eines bestimmten Sensorsignals für einen Formstoff die gleiche Dichte im Messpunkt sowohl am Prüfkörper als auch an der Form erreicht werden muss. Sonst würden sich die Festigkeitswerte unterscheiden. Das bedeutet, dass die am Prüfkörper erzielten Kalibrierkurven zur Berechnung der Formstoffdichte im Messpunkt auf der Basis der Sensoranzeige auf die praktischen Verhältnisse übertragbar sind.

7.3. Dauerversuche

Ziel dieser Untersuchungen war es, die Funktionstüchtigkeit des Sensors unter schwierigen Bedingungen einer Gießerei zu prüfen. Die Versuche wurden bei SCHUBERT&SALZER EISENWERK ERLA durchgeführt. Der Sensor wurde auf 0,7 N Vorspannung eingestellt und in der Mitte einer Modellplatte bei der Produktion der Formen für Kurbelwellen eingesetzt. Die Modellplatte wurde auf der Schwenkplatte bei DISAMATIC-Formanlage 2013 MK 4 befestigt. Die Modellplatte wurde durch eine Heizkammer bis ca. 50° C beheizt und bewegte sich im Arbeitszyklus. Die Arbeitsbedingungen waren nicht einfach. Die Werte wurden dann bei 308 Formen kontinuierlich aufgenommen. Die Taktzeit der Maschine betrug für die Produktion einer Halbform ca. 11 Sekunden. Die Kalibrierkurven zur Berechnung der Formstoffdichte im Messpunkt wurden nach der im Kapitel 5.4 beschriebenen Methode erhalten. Allerdings wurde die Auswirkung der Formstofftemperatur nicht berücksichtigt, weil es technisch unmöglich war, die Kalibrierkurven direkt am Fließband mit dem Formstoff zu bekommen.

Im Bild 7-7 wird eine für Disamatic-Formanlage typische Verdichtungskurve dargestellt. Beim Sandfüllvorgang wird bei der Anlage die Mischung bestehend aus dem Formstoff und Luft in die Verdichtungskammer geschossen. Dabei wird der Formstoff schon vorverdichtet. Bei dem an der Formanlage eingestellten Füllregime wurde der Formstoff bis ca. 1280 – 1300 kg/m³ vorverdichtet (Punkt 1 im Bild 7-7). Diese Füll- und Verdichtungsphase ist sehr kurz. Danach, nach ca. 0,44 Sekunde, begann die Pressphase der Verdichtung (Punkt 2). Leider war es unmöglich, den Pressdruckanstieg an der Druckplatte zu ermitteln. Die Pressphase dauerte ca. 0,77 s., danach wurde der Pressdruck 0,1 s. konstant gehalten (bis Punkt 3). Im Punkt 4 wurde die Presse entlastet und nach ca. 0.06 s. Wartezeit wurde das Modell von der Form getrennt. An den meisten Formen war die Rückfederung im Punkt 3 sehr klein. Bei manchen (6 von 308 kontrollierten Formen) Formen nahm die Rückfederung nach der Presseentlastung erheblich zu. Im Bild 7-8 werden die maximalen bei der Verdichtung ereichten Dichtewerten von 308 Formen zusammengefasst. Man sieht, dass der Verdichtungsgrad bei den meisten produzierten Formen fast konstant ist. Fast alle Schwankungen der Dichte liegen im Bereich der Genauigkeit des Sensors, was ein Beweis für konstante Formstoffbeschaffenheit und Reproduzierbarkeit der Verdichtung darstellt. Der im Modell eingebaute Sensor hat bei den Versuchen reibungslos funktioniert. Es gab keine Zwischenfälle, wo der Sensorfühler durch den Staub oder durch die Klebewirkung des Bentonits eingeklemmt wurde.



Bild 7-7: Verdichtungskurve der Formanlage



Bild 7-8: Maximale Dichtewerte bei den kontrollierten Formen

7.4. Software- und Ausstattungsbeispiele zur betrieblichen Gewinnung der Kalibrierkurven und Dichteüberwachung

Zur Gewinnung der Kalibrierkurven unter Betriebsbedingungen können die in der Gießereipraxis üblichen Geräte zur Bestimmung der Verdichtbarkeit des Formstoffes, wie zum Beispiel PVG-P Verdichtbarkeitsprüfapparat von DISA AG ausgestattet mit zwei oder mit einem Sensor und mit einem Wegaufnehmer eingesetzt werden. Im Vergleich zum Neubau ist die Aufrüstung der vorhandenen Geräte unkompliziert und kostengünstig. Bei der Anwendung der modernen Prüfstationen wie PVF-C Minilab von DISA AG ist nicht nur die Gewinnung der Kalibrierkurven sondern auch die Messung der Parameter zur Ermittlung der Abhängigkeiten zwischen der Formstoffdichte und unterschiedlichen Formfestigkeitseigenschaften möglich. Dies ermöglicht die kontinuierliche Kontrolle der Formfestigkeitseigenschaften in Messpunkten an der Form, indem sie auf der Basis der durch die Sensoranzeigen berechneten Dichtewerten festgestellt werden.

Zur Erfassung der Kalibrierkurven, deren Analyse, Dichteüberwachung und Anlageeinstellung wurden einige PC-Anwendungen entwickelt, die eine Basis zur Entwicklung der betrieborientierten Überwachungs- und Steuerungsanwendungen darstellen. In Bilder 7-9 bis 7-11 sind die PC-Anwendungen zur Messung und Auswertung der Kalibrierkurven dargestellt. Die lassen es zu, die Kalibrierkurve mit einstellbaren scanrate zu erfassen und in einer Datei zu speichern. Dann wird die aufgenommene Datei nochmals geladen und ein Ausschnitt definiert für dessen eine Analyse zur Bestimmung der Koeffizienten ρ'_{N} und k' durchgeführt werden muss. Das Analysebeispiel wird Bild 7-11 dargestellt. Bei der Analyse von mehreren Kurven werden die Erwartungswerte für Koeffizienten ρ'_{N} und k' festgestellt. Die gewonnenen Koeffizienten werden gespeichert. Dieses Programm kann zur Bestimmung der Korrelationen zwischen der Formstoffdichte und der Formfestigkeitseigenschaften verwendet werden mit dem Unterschied, dass die Daten manuell eingetragen werden müssen. Die Auswertung kann nicht nur für lineare sondern auch für exponentiale und polynominale Abhängigkeitstypen durchge-



Bild 7-9: PC-Anwendung zur Erfassung der Kalibrierkurven.



Bild 7-10: PC-Anwendung zum Markieren des Kalibrierkurvenausschnittes



Bild 7-11: PC-Anwendung zur Bestimmung der Koeffizienten $\rho'_{\scriptscriptstyle N}$ und k'



Bild 7-12: PC-Anwendung zur Dichtemessung direkt an der Form

führt werden. Im Bild 7-12 wird eine PC-Anwendung zur Dichtemessung direkt an der Form dargestellt. Die Anwendung lässt die Messungen unter Einsatz von zwei Sensoren zu. Der Sensorenanzahl kann beim Bedarf vergrößert werden. Die gewonnenen Koeffizienten werden zur Berechnung der Dichtewerten auf der Basis der Sensoranzeigen manuell aufgerufen. Das Starten und Beenden der Erfassung und Berechnung werden ebenfalls manuell gesteuert. Dieses Programm wurde nur zur Forschungszwecken entwickelt. In den industrieorientierten Anwendungen muss die Datenerfassung gesteuert von der Formmaschine erfolgen.

Die Einschätzung der Reproduzierbarkeit der Formqualität erfolgt durch die Analyse der erreichten Formeigenschaften und kann als laufende Kurve oder als ein Histogramm visualisiert werden. Diese Daten dienen als Beweis der Formqualität und ihrer Reproduzierbarkeit.

Die Formmaschine kann auch in Abhängigkeit von der erreichten Formqualität gesteuert werden. Diese Steuerprogramme werden hier nicht dargestellt, weil sie normalerweise immer auf die Arbeitsweise der Formmaschine angepasst werden müssen.

7.5. Konsequenzen

Die in diesem Kapitel beschriebenen Versuchsergebnisse lassen nachstehende Schlussfolgerungen zu:

- beim Erreichen der gleichen Sensorsignale an der Form und am Pr
 üfkörper sind die Formh
 ärte und Formfestigkeitswerte (und folglich die Dichtewerte) gleich. Das bedeutet, dass die an der Pr
 üfanlage erhaltenen Kalibrierkurven auch unter praktischen Bedingungen relevant sind;
- die ersten Dauerversuche haben die Funktionstüchtigkeit der Sensoren zur Messung der Formstoffdichte direkt an der Form bestätigt und können insgesamt als erfolgreich bezeichnet werden.

8. Erarbeitung von Methoden zur kontinuierlichen Bestimmung der Druck- und Zugfestigkeit direkt an der Form sowie zur Einschätzung der "formbezogenen" und "energetischen" Qualitätsmerkmale der Formmaschinen

8.1. Erarbeitung einer Methode zur kontinuierlichen Bestimmung der Druck- und Zugfestigkeit direkt an der Form

Die Kontrolle der Formfestigkeit ist bei der Formqualitätsbestimmung unabdingbar, da schließlich nicht die Formstoffdichte, sondern die aus der Formstoffzusammensetzung und der beim Verdichten erreichten Dichte resultierende Grünfestigkeit der Form es erlaubt, die Sandform vom Modell abzuheben, die Form nachzubehandeln, Kerne einzulegen, die Form zuzulegen und abzugießen. Deshalb wurde nach der im Kapitel 3 durchgeführten Analyse eine Methode zur Berechnung der Druck- und Zugfestigkeit durch die nach dem Verdichten erhaltene Formstoffdichte unter Berücksichtigung der Formstoffzusammensetzung entwickelt.

Bei weiteren Untersuchungen wurden die Prüfkörper immer mit der Verdichtungsart Pressen hergestellt, damit die dem Formstoff zugeführte Verdichtungsenergie genau kontrolliert werden kann. Die zur Zeit in den Gießereien zur Herstellung der Formen angewendeten Formmaschinen arbeiten im Pressduckbereich von 0,5 bis 2,5 MPa. Bei Verdichtung mit dem Druck, der kleiner als 0,5 MPa ist, sind die Festigkeitseigenschaften der Form sogar bei höheren Bindetongehalten unzureichend. Eine Verdichtung mit den Drücken > 2,5 MPa hat nur geringe Auswirkung auf die Formqualität und ist deshalb nur wenig sinnvoll. Deshalb wurden die Abhängigkeiten zwischen Druckfestigkeit und Formstoffdichte sowie zwischen Zugfestigkeit und Formstoffdichte in dem oben erwähnten Druckbereich untersucht.

In den Bilder 8-1 und 8-2 sind die Messergebnisse für drei unterschiedliche Testmischungen dargestellt. Der Formstoff 1 wurde mit dem Quarzsand WF gefertigt und enthielt 5 % Bentonit IKO BOND D OE. Die Verdichtbarkeit



Bild 8-1: Abhängigkeit Druckfestigkeit = f (Dichte) für unterschiedliche Formstoffe



Bild 8-2: Abhängigkeit Zugfestigkeit = f (Dichte) für unterschiedliche Formstoffe

104

betrug 41,5 %. Der Pressdruckbereich wurde von 0,1 bis 2,5 MPa ausgewählt. Der Formstoff 2 wurde mit dem Quarzsand H33 gefertigt und enthielt 7 % Bentonit IKO BOND D sowie 4 % feinen Kohlenstaub. Die Verdichtbarkeit betrug 41 %. Die Messungen wurden im Pressdruckbereich von 0,5 bis 2,5 MPa durchgeführt. Der Formstoff 3 wurde mit dem Quarzsand H32 gefertigt und enthielt 7 % Bentonit IKO BOND D OE. Die Verdichtbarkeit betrug 38 %. Die Abhängigkeiten zwischen den Festigkeitseigenschaften und der Formstoffdichte wurden im Bereich von 0,25 bis 2,5 MPa untersucht. Bei allen Messungen wurde der Formstoff immer mit einer konstanten Masse von 150 g dosiert. Die Prüfkörperhöhe von 50 mm konnte wegen der angewendeten Versuchsweise nicht gewährleistet werden und wurde deshalb nach der Verdichtung mit einem Messschieber gemessen und damit die Prüfkörperdichte ermittelt. Danach wurden die in der Gießereipraxis übliche Messungen zur Bestimmung der Druck- und Zugfestigkeit durchgeführt.

Aus dem Bild 8-1 geht deutlich hervor, dass die Abhängigkeiten zwischen Druckfestigkeit des Prüfkörpers und der Prüfkörperdichte unabhängig von der Formstoffzusammensetzung in den untersuchten Druckbereichen linear sind. Man sieht aber, dass sich die Kurven in Abhängigkeit von der Formstoffzusammensetzung verschieben. Zu den die Abhängigkeitenverschiebung beeinflussenden Größen zählen:

- Bindetongehalt und -art;
- Befeuchtungsgrad (Verdichtbarkeit);
- Zusatzstoffgehalt und -art;
- Quarzsandart;
- Oolithisierungsgrad.

Wegen der zu hohen Anzahl von Einflussgrößen ist es wenig sinnvoll, zu versuchen, diese Abhängigkeiten wissenschaftlich begründet zu ermitteln. Wesentlich einfacher ist es, die Abhängigkeit zwischen Druckfestigkeit und der Formstoffdichte für einen bestimmten Formstoff experimentell festzustellen. Dafür müssen nur zwei Messungen der Prüfkörperdichte mit anschießender Druckfestigkeitsprüfung bei unterschiedlichen Pressdrücken bei-

spielsweise bei 0,5 und 2,0 MPa (oder bei einer unterschiedlichen Anzahl von Rammschlägen) durchgeführt werden, da die Abhängigkeit linear ist. Die Messergebnisse werden in das Programm zur Qualitätskontrolle der Form eingegeben. Damit kann die Berechnung der Druckfestigkeit im Messpunkt an der Form durch die Formstoffdichte, die auf der Basis der Sensoranzeige berechnet wird, für jede hergestellte Form bei einem konstanten Formstoff kontinuierlich erfolgen.

Wenn man die Abhängigkeit zwischen der Zugfestigkeit und der Dichte der Prüfkörper betrachtet (Bild 8-2), so erkennt man, dass diese Abhängigkeit als linear unabhängig von der Formstoffzusammensetzung zu bezeichnen ist. Die Kurvenverschiebung ist ähnlich wie bei der Abhängigkeit zwischen Druckfestigkeit und der Formstoffdichte von der Formstoffzusammensetzung abhängig. Da sich die Zugfestigkeit bei den höheren Verdichtungsgraden verkleinert, kann die Abhängigkeit zwischen Zugfestigkeit und der Formstoffdichte nur durch die Durchführung von mindestens 4 Versuchen ermittelt werden. Die Verdichtungsdrücke sollen dabei in Abhängigkeit von Formstoffzusammensetzung der ausgewählt werden. Die Versuchsergebnisse werden ähnlich wie bei der Druckfestigkeitskontrolle in das Programm für die Qualitätskontrolle der Form eingegeben. Die weitere Festigkeitsberechnung in den Messpunkten an der Form erfolgt automatisch. Die empirischen Funktionen zur Berechnung der Druck- und Zugfestigkeit auf der Basis der Formstoffdichte werden wie folgt definiert:

$$\sigma_{dB} = a_{dB} + k_{dB} \rho_1, \qquad (8.1)$$

bei
$$\sigma_{zB} \leq \sigma_{max}$$
 $\sigma_{zB} = a_{zB} + k_{zB}\rho_1$, (8.2)

bei $\sigma_{zB} > \sigma_{max}$	$\sigma_{zB} = \sigma_{\max} - k_{zB1}(\rho_1 - \rho_m),$	(8.3)

wobei

 σ_{dB} - Druckfestigkeit;

 σ_{zB} - Zugfestigkeit;

Koeffizient, der die Fähigkeit des Formstoffes zur Verfestigung bezogen auf die Druckfestigkeit mit zunehmender Formstoffdichte ausdrückt;

- Koeffizient, der die Fähigkeit des Formstoffes zur Verfestigung bezogen auf die Zugfestigkeit mit zunehmender Formstoffdichte ausdrückt;
- σ_{\max} maximal erreichbare Zugfestigkeit für einen bestimmten Formstoff;
- ρ_m Formstoffdichte bei der maximal erreichten Zugfestigkeit;
- ρ_1 in Echtzeit zu bestimmende Formstoffdichte;
- *a_{dB}* Koeffizient bei der Druckfestigkeitsberechnung;
- a_{zB} Koeffizient bei der Zugfestigkeitsberechnung;

Alle in den Funktionen eingehenden Koeffizienten werden vom Bearbeitungsprogramm nach der Eingabe der Messergebnisse automatisch berechnet. Diese Funktionen gelten aber nur in dem untersuchten Druckbereich und sind keinesfalls auf die gesamten Abhängigkeiten (beim Pressdruck von 0 bis 10 MPa) übertragbar. Zusätzlich zu der Bestimmung der Druck- und Zugfestigkeit kann auch die Spaltfestigkeit berechnet werden, indem die Zugfestigkeit durch 0,637 geteilt wird.

Die betrieblichen Schwankungen der Formstoffzusammensetzung haben keine spürbare Auswirkung auf die Abhängigkeiten zwischen Dichte und Druck- sowie Zugfestigkeit. Wenn aber der Formstoff stark geändert wird, dann müssen die Abhängigkeiten erneut ermittelt werden, was durch die erneute Durchführung von oben beschriebenen Messungen gemacht werden muss.

Die Festigkeitskontrolle ist in der Praxis aber nur bei der Einstellung der Formmaschine auf ein bestimmtes Sortiment sinnvoll. Wenn man die dem verwendeten Formstoff angepasste Verdichtungscharakteristik gefunden hat, bei der die Festigkeitseigenschaften der Form ausreichend sind, so muss bei der Produktion nur die Formstoffdichte kontrolliert werden, da bei gleichen Dichtewerten unter der Voraussetzung, dass der Formstoff konstant bleibt, die gleiche Festigkeitseigenschaften automatisch gewonnen werden. Bei

107

dem eventuellen Auftreten von Verdichtbarkeitsschwankungen im Bereich $\leq \pm 2$ % Verdichtbarkeit kann man im Prinzip davon ausgehen, dass bei gleichen Dichtewerten in Messpunkten auch gleiche Festigkeitseigenschaften auftreten. Die dabei auftretenden Unterschiede sind für die Praxis unbedeutend.

8.2. Erarbeitung einer Methode zur Einschätzung der "formbezogenen" und "energetischen" Qualitätsmerkmale der Formmaschinen

In modernen Gießereien wird der größte Anteil der Gießformen mit Hilfe der Formmaschinen hergestellt. Im Allgemeinen lassen sich die Formmaschinen wie folgt definieren: Formmaschinen sind Werkzeugmaschinen der Sandformerei, die mit Hilfe der Werkzeuge (Modelleinrichtung, Kernkasten) aus den Werkstoffen (Form-, Kernformstoff) die Werkstücke Formen und Kerne (Formteile) herstellen [1].

Die Aufgaben der Formmaschine sind:

- Einfüllen des Formstoffes in bzw. auf das Urformwerkzeug,
- Verdichten des Formstoffes in Verbindung mit der angestrebten Verfestigung,
- Ausformen bzw. Ausschalen, d. h. Trennen der Form oder des Kernes vom Urformwerkzeug (Modell, Kernkasten).

Formmaschinen lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten einteilen. Als wesentliche sind zu nennen [1]:

- die Methode bzw. das Prinzip des Trennens von Modell und Form,
- die Antriebsart,
- die Anzahl der Stationen, auf denen die notwendigen Arbeitsschritte für die Formherstellung realisiert werden,
- die Anzahl der Formmaschinen je Formanlage,
- die Formart,
- die Methode der Formstoffverdichtung,
- die Anzahl der Verdichtungsstufen,
- die Art der Verbindung zwischen Formmaschine und Modelleinrichtung,
- die Art der Formteilung.

Das, was die Formmaschinen unterschiedlicher Hersteller gemeinsam haben und womit sie zu vergleichen sind, ist, dass jede Formmaschine zur Erfüllung der oben erwähnten technologischen Aufgaben einen bestimmten Energieaufwand pro Form verbraucht. Der eigentliche Arbeitsvorgang zum Verdichten des Formstoffes von der Dichte ρ_0 (Dichte des Formstoffes auf dem Bandförderer) bis zur Solldichte [ρ] setzt sich aus zwei Teilen:

- Vorverdichtung des Formstoffes beim Sandfüllvorgang;
- Verdichtung des Formstoffes durch die Wirkung der Formmaschine.

Die Energiekosten pro Form k_g lassen sich folglich aus den beim Einfüllen des Formstoffes entstehenden Energiekosten k_e und den Energiekosten beim Verdichten k_v :

$$k_g = k_e + k_v$$
, (8.4)

Unter diesen Kosten versteht man die Kosten für elektrische Energie, die von der Maschine zur Verwirklichung der oben erwähnten Arbeitsvorgängen geleistet wurde.

Um den Kostenanteil festzustellen, der notwendigerweise zur Gewährleistung der benötigten Formeigenschaften ausgegeben wurde, muss man wissen, in welchem Grad die nach dem Verdichtungsvorgang erreichte Formqualität der erforderlichen Formqualität entspricht.

Ist eine Gießform zur Herstellung von bestimmten Gusssortiment zu produzieren, so müssen zunächst ein Formstoff und eine passende Formmaschineneinstellung ausgewählt werden, mit deren sichergestellt wird, die Formen mit den erforderlichen Formeigenschaften in allen Formpartien zu fertigen. Diese Formeigenschaften werden durch die technisch-technologischen Bedingungen bestimmt. Die vorher erarbeiteten Mess- und Berechnungsmethoden lassen es zu, die Formstoffdichte sowie die Druck- und Zugfestigkeit bei jeder hergestellten Form kontinuierlich zu kontrollieren. Durch den Vergleich der gemessenen Formeigenschaften mit den vorgegebenen Sollwerten kann ermittelt werden, in welchem Grad sie in den Messpunkten erreicht wurden. Als Sollwerte können die von der Technologie gegebenen Werte der benötigten Formqualität oder einfach die Werte, bei denen die ausreichende Gussqualität gewährleistet wird (werden experimentell an der Formmaschine bestimmt), benutzt werden.

Die erarbeitete Messtechnik wird normalerweise in gefährdeten Formpartien dort eingesetzt, wo es nicht bekannt ist, ob die erforderliche Formqualität überhaupt erreicht werden kann. Der Fall der Überverdichtung der Form tritt auf diesen Stellen nicht auf. Deshalb wird die Überverdichtung der Form weiter auch nicht betrachtet.

Wird der Formstoff von der Dichte ρ_0 (Dichte des Formstoffes auf dem Bandförderer) bis zur Dichte ρ durch die Wirkung der Formmaschine verdichtet, so lässt sich der erreichbare Grad eines vorgegebenen Dichtewertes [ρ] wie folgt definieren:

$$g_{\rho} = \frac{\Delta \rho}{\left[\Delta \rho\right]} = \frac{\rho - \rho_0}{\left[\rho\right] - \rho_0}, \qquad (8.5)$$

Weil bei den oben definierten Arbeitsvorgängen die Verdichtungsenergie zur Verdichtung des Formstoffes um den Dichtebeitrag $\Delta \rho$ geleistet wird, wird an der Stelle die erreichte Dichteänderung $\Delta \rho$ mit der vorgegebenen Dichteänderung [$\Delta \rho$] verglichen. Der erreichbare Grad eines vorgegebenen Druckfestigkeitswertes ergibt sich aus der Gleichung (8.6):

$$g_{dB} = \frac{\sigma_{dB}}{\left[\sigma_{dB}\right]},\tag{8.6}$$

Und der erreichbare Grad eines vorgegebenen Zugfestigkeitswertes wird nach der Gleichung (8.7) berechnet.

$$g_{zB} = \frac{\sigma_{zB}}{\left[\sigma_{zB}\right]},\tag{8.7}$$

In diesen Gleichungen sind σ_{dB} und σ_{zB} die während der Verdichtung erreichten Druck- und Zugfestigkeitwerte. Die Größen [σ_{dB}] und [σ_{zB}] sind entsprechend die Sollwerte der Druck- und Zugfestigkeit der Form. Der gesamte Grad der Gewährleistung der Formqualität bezüglich der erreichten Formstoffdichte und erreichten Formfestigkeitseigenschaften g_{ges} ergibt sich durch das Multiplizieren der oben dargestellten Koeffizienten:

$$g_{ges} = g_{\rho} \cdot g_{dB} \cdot g_{zB} , \qquad (8.8)$$

Wird der Sensor oder mehrere Sensoren in gefährdeten Stellen zur Qualitätskontrolle eingesetzt, so gibt der Koeffizient g_{ges} die verallgemeinerte Aussage über die in der Form minimal erreichten Formqualität, da in den anderen Formpartien die Formeigenschaften automatisch besser sein werden. Wird aber die geforderte Formqualität in den gefährdeten Partien nicht erreicht (g_{ges} ist zu klein), so wird der gesamte Energieaufwand umsonst geleistet, da in der Form kein qualitätsgerechtes Gussstück produziert werden kann. Deshalb kann man den Koeffizient g_{ges} sowie die anderen Koeffizienten zur Beurteilung der Formqualität in der gesamten Form benutzen. Durch die Benutzung dieser Methode kann folglich festgestellt werden, in welchem Grad und mit welchen Kosten eine bestimmte Formqualität erreicht wird.

Zum Vergleich von unterschiedlichen Formmaschinen mit eventuell unterschiedlichen Verdichtungsweisen bei gleichem Produktionssortiment müssen die Kosten für die verbrauchte Energie k_g bei den gleichen Koeffizienten g_{ges} verglichen werden. Damit wird festgestellt, welche Formmaschine für dieses Sortiment ökonomischer ist. Falls die Formmaschinen mit unterschiedlich großen Modellplatten (falls in einer Form mehrere Gussteile hergestellt werden z.B. bei der Produktion von Kurbelwellen) und bei den unterschiedlichen Taktzeiten beim gleichen Sortiment arbeiten, sollte außerdem die Anzahl der Gussteile pro Modellplatte und die Taktfrequenz berücksichtigt werden. Die Energiekosten pro Form k_g werden in dem Fall mit der Anzahl der Formen, die in einem bestimmten Zeitintervall produziert wurden, multipliziert und durch die Anzahl der in dieser Zeit produzierten Gusstücke geteilt. Dann werden die Energiekosten für die Gewährleistung der gleichen Formqualität bei der Produktion eines Gussteils k_{GT} verglichen. Die Anzahl der in dem untersuchten Zeitintervall produzierten Gussteile muss dabei berücksichtigt werden.

Darüber hinaus ergibt sich das "formbezogene" Qualitätskennzeichen der Formmaschine als Grad der Gewährleistung der Formqualität g_{ges} . Unter dem "energetischen" Qualitätskennzeichen der Formmaschine versteht man den Energieaufwand (elektrische Energie) bzw. die Kosten für diese Energie k_g pro Form oder pro Gussteil k_{GT} . Qualitätskennzeichen g_{ges} gibt außerdem die prozentuelle Aussage, welche Energie- oder Kostenanteil zweckmäßig zum Erreichen der vorgegebenen Formqualität ausgegeben wurde.

9. Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die neuartige Messmethode zur Erfassung der von der Formstoffbewegung in dem Messpunkt hervorgerufenen Kräfte vorgeschlagen. Auf dieser Basis sind neuartige Sensoren zur kontinuierlichen Qualitätskontrolle der Gießformen entwickelt worden. Die Sensoren können in den Modellträger oder im Modell selbst in den Formpartien, wo die Formqualität am niedrigsten ist, zur Erfassung dieser Kräften so einmontiert werden, dass keine Beschädigung der Formoberfläche stattfindet.

Die danach erarbeiteten Kalibrier- und Berechnungsmethoden lassen es zu, die direkt an der Form während der Produktion erfassten Sensorsignale in Formdichte-, Druck- und Zugfestigkeit umzurechnen. Dabei kann auch die Rückfederung des Formstoffes nach der Formentlastung erfasst werden. Die erarbeiteten Messeinrichtungen und Berechnungsmethoden wurden sowohl durch die Laboruntersuchungen als auch durch den direkten Praxiseinsatz Während dieser Prüfungen wurde festgestellt, geprüft. dass die Formqualitätskennzeichen mit ausrechender Genauigkeit festgestellt werden können. Das ermöglicht die kontinuierliche rechnergestützte Qualitätskontrolle der hergestellten Formen. Die Auswirkung der veränderlichen Formstoffzusammensetzung auf die zur Berechnung der Formqualitätskennzeichen benötigten Koeffizienten wurde untersucht. Auf der Basis dieser Untersuchungen wurde die Methodik erarbeitet, die es zulässt, die Verschiebung der Kalibrierkurven für die Dichteberechnung bei Auftreten der Verdichtbarkeitsschwankungen dem automatisch zu bestimmen. Damit entfällt der Bedarf an der erneuten Kalibrieren der Sensoren.

Abschließend wurde eine Methode zur Ermittlung der "formbezogener" und "energetischer" Qualitätsmerkmale der Formanlagen vorgeschlagen. Die Methode lässt den Vergleich der Formmaschinen auf der Basis der erreichten Formqualität und des zum Erreichen der Formqualität geleisteten Energieaufwandes. Diese Qualitätskennzeichen dienen als verallgemeinernde Merkmale und sind von dem Wirkungsprinzip der Anlage unabhängig.

113

10. Literaturverzeichnis

- [1] Flemming E., Tilch W., Formstoffe und Formverfahren. Leipzig-Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1993
- [2] Rodenhüser, A., Gießerei 16 (1929) 13, S. 413-421
- [3] Gesell, W., Arbeiten mit Pressformmaschinen unter Normalbedingungen und bei hohen spezifischen Pressdrucken (Forschungsbericht des Landes Nordrein – Westfallen, Nr. 887)
- [4] Schaarschmidt, E., Dissertation (A), Bergakademie Freiberg, 1968
- [5] Bindernagel, J., Nowacki, K., Orths, K.; Gießerei 57 (1970), S. 65-69
- [6] VDG Merkblatt P 38: "Prüfung von tongebundenen Formstoffen"
- [7] Grandlund, M. J., Konferenz-Einzelbericht: AFSInt. Sand Molding Conf., San Antonio, USA (1992), S. 71-78
- [8] Egen, H. W.; Döpp, R.; Flemming, E. Gießerei 85 (1998) 7, S. 61-66
- [9] Carey, P. R.; Granlund, M. J.; Krysiak, M. B.. Transaction of the American Society (1992) 100, S. 37-55
- [10] Fonderie, Fondeur d'aujourd'hui (1991) 109, S. 43-44
- [11] Orlov G. M., Automatisaziâ i mechanisaziâ prozessa isgotovleniâ litejnich form. Moskau: Maschinostroenie, 1988
- [12] Orlov, G. M., Soviet Casting Technology (1989) 9, S. 16-18
- [13] Tilch, W., Dissertation (A) an der Bergakademie Freiberg, 1972
- [14] Boenisch, D., Gießerei 69 (1982) 21, S. 593-598
- [15] S. S. Žukovskij, Protschnost liteinoj formy. Moskau: Maschinostoenie, 1989
- [16] Bindernagel I., VDG-Taschenbuch «Formstoffe und Formverfahren in der Gießereitechnik». Düsseldorf: Gießerei-Verlag GmbH, 1983
- [17] Zitovitsch N. A., Mechanika gruntov. Moskau: Visschaja schkola, 1973
- [18] Gregory P. Tshebotarioff, Soil, mechanics, foundations and earth structures. New York, 1968
- [19] Reiner M. Reologiâ. Moskau: Maschinostroenie, 1965
- [20] Bast J.; Nikolov K., Gießereiforschung 45 (1993) 4, S. 142-146
- [21] Rich, C; Krysiak, M. B., Modern Casting 83 (1993) 3, S. 35-38
- [22] Michailov A. M. und andere, Litejnoe proisvodstvo. Moskau: Maschinostroenie, 1987

- [23] Medvedev A. I., Valisovskij I. V., Technologitscheskie ispitanija formovotschnich materialov. Moskau: Maschinostroenie, 1973
- [24] Medvedev A. I., Gasovye prozessy v litejnoj forme. Moskau: Maschinostroenie, 1980
- [25] Weiss R., VDG-Taschenbuch "Formgrundstoffe. Vorkommen, Eigenschaften, Prüfung, Einsatzmöglichkeiten". Düsseldorf: Gießerei-Verlag GmbH, 1984
- [26] Tilch W., Flemming E., Gießereitechnik 31 (1985) 11, S. 334-339
- [27] Schukle L., Reologitscheskie problemi mechaniki gruntov. Moskau: Stroiisdat. 1973
- [28] Hofmann F., VDG-Taschenbuch Tongebundene Formsande». Düsseldorf: Gießerei-Verlag GmbH, 1975
- [29] Berg P. P., Katschestvo litejnoj formy. Moskau: Maschinostroenie, 1971
- [30] Aksjonov P. N. u N. P.: Ausrüstungen von Gießereien, Bd 2. Berlin: Verlag der Technik, 1953
- [31] Levelink, H. G. u van den Berg, H.: Modern Casting 41 (1962) 3, S. 80-91
- [32] Godding, R. G. u. Rew, R.: BCIRA-J.10 (1962) 3, S. 366-378
- [33] Hofmann, F., Giesserei 50 (1963) 26, S. 815-822
- [34] Bex, T. Modern Casting 81 (1991) 10, S. 42
- [35] Uhl, L.-E., BCIRA International Conference (1991) Warwick Vortrag 15
- [36] Hastings, L. Foundry Trade Journal 165 (1991) 3426, S. 74, 76, 79
- [37] Lessiter, M. J. Modern Casting 82 (1992) 6, S. 40-41
- [38] Hofmann, F.; Dielert, H. W. u. Graham, A. L.: Modern Casting 56 (1969)Nr. 1, S. 134-140
- [39] Hofmann, F.: Giesserei 55 (1968) 12, S. 301-310
- [40] Boenisch, D.: Giesserei 53 (1966) 18, S. 565-574
- [41] Boenisch, D.: Giesserei 59 (1972) 8, S. 226-238
- [42] Gesell, W., Giesserei 41 (1954) 3, S. 57-62
- [43] Hofmann, F., Technologie der Gießereiformstoffe, Schaffhausen, 1966
- [44] DIN Taschenbuch 29: "Federn (Normen)". Berlin-Köln: Beuth Verlag GmbH, 1991
- [45] Liefer- und Kalibrierprotokoll f
 ür Kraftmessdosen Typ 8438-501
- [46] Porochnja, V. M., u.a.: Litejnoe Proizvodstvo (1990) 8, S. 24

- [47] Strobl, S. M., Schuster, F. W.: Modern Casting 87 (1997) 2, S 48-50
- [48] Hansberg, G.: BCIRA International Conference 1991. Greensand mozlding – the future. Warwick (1991), S 2.1-2.12
- [49] Williams, N. B.: BCIRA International Conference 1991. Greensand mozlding – the future. Warwick (1991), S 9.1-9.11
- [50] Uzaki, N.: Giesserei, 84. AFS annual meeting, 67 (1980), S. 675-677
- [51] Miske, J. C.: Foundry Management and Technology Band 110 (1982) 7,S. 24-26, 28, 30-31
- [52] Spickermann, W.: Giesserei 69 (1982) 4, S. 88-92
- [53] Botov, A. P., u.a.: Litejnoe Proizvodstvo (1993) 2/3, S. 12-14
- [54] Liedtke, H.: Giesserei 84 (1997) 13, S.33
- [55] Voss, G.: Giesserei 86 (1999) 6, S. 150-153
- [56] Sindermann, H., Damm, H.: Casting Plant and Technology, Band 1 (1985) 1, S. 4, 6, 8-9
- [57] Künkel-Rausch, W., Schaarschmidt, E.: Casting Plant and Technology, Band 7 (1991) 1, S. 22, 24, 26
- [58] Schaarschmidt, E.: Bayanz. Kohasz. Lapok 40 (1989) 7, S. 151-158
- [59] Matveenko, I. V., Isagulov, A. Z.: Litejnoe Proizvodstvo (1991) 5, S. 21-23
- [60] Orlov, G. M.: Litejnoe Proizvodstvo (1989) 6, S. 20-21
- [61] Korotchenko, A. Yu., Konyshev, A. V., Verbickij, V. I.: Litejnoe Proizvodstvo (1989) 8, S. 25-27
- [62] Riester, H.: Giesserei 76 (1989) 10/11, S. 342-349
- [63] Khimanov, V. S.: Litejnoe Proizvodstvo (1987) 3, S. 30-31
- [64] Schaarschmidt, E.: Casting Plant and Technology 1 (1985) 4, S. 12, 14-16, 21-23
- [65] Korotcenko, A. J.: Litejnoe Proizvodstvo (1994) 9, S 12-14
- [66] Houard, F., Labbe, D., Pichouron, J.: Fonderie, Fondeur d'aujourd'hui, (1994) 137, S. 32-38
- [67] Velte, G.: Gießerei Erfahrungsaustausch 40 (1996) 11, S. 437-440
- [68] Kipfer, L. R., Mzoczek, M. J.: Engineered Casting Solutions 3 (2001) 1 S. 45-47
- [69] Renker, D., Tilch, W., Bast, J.: Gießerei Praxis (2000) 9, S. 389-394
- [70] Tillmanns, H.:Giesserei 86 (1999) 11, S. 23-34