

# **Prozesssicherheit in der Formstoffaufbereitung mit Hilfe der Fuzzy-Logik**

Von der Fakultät für Werkstoffwissenschaften und Werkstofftechnologie

der Technischen Universität Freiberg

genehmigte

## **DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Heiko Gemming

geboren am 25.04.1960 in Kamp-Lintfort

Gutachter :     Herr Prof. Dr.-Ing habil. Werner Tilch, Freiberg  
                  Herr Prof. Dr.-Ing. Heinz-Josef Wojtas, Duisburg  
                  Herr Dr. sc. techn. Friedhelm Meister, Mülheim

Tag der Verleihung : Freiberg, den 13.06.2003

## Danksagung

Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Tilch danke ich für die Übernahme der Betreuung des Promotionsverfahrens und seiner jederzeit erwiesenen Unterstützung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-J. Wojtas gilt mein besonderer Dank für die Überlassung dieses Themas, als auch dafür, das er diese Arbeit seitens des Fachbereichs Hütten- und Gießereitechnik der Gerhard-Mercator-Universität-Gesamthochschule betreute und mir jederzeit für fachliche Unterstützung zur Verfügung stand.

Für die Unterstützung bei der Durchführung der Praxisversuche danke ich den Mitarbeitern der beteiligten Gießereien. Insbesondere zu nennen sind die Herren Dipl.-Ing. R. Rietzcher und Dipl.-Ing. M. Rosenthal (Firma Georg Fischer), Herrn Dipl.-Ing. W. Scholz (Firma R. Woeste) und Herrn Dipl.-Ing. E. Fritsche (Firma AE Goetze). Alle weiteren Mitarbeiter, die bei der Durchführung der Versuche beteiligt waren, möchte ich ausdrücklich in diesen Dank einschließen.

Herrn Dr. M. Köppen (Firma IKO-Erbslöh) danke ich für die Überlassung von Ausgangsmaterialien sowie für die fruchtbaren Diskussionen zum Verhalten der Formstoffe.

Allen Mitarbeitern des Fachbereichs 8 der Gerhard-Mercator-Gesamthochschule Duisburg danke ich für die freundliche Aufnahme und die immer gewährte Unterstützung. Besonders danke ich Herrn Bergander, Herrn Almer und Herrn Pollmann für unzählige Hilfestellungen bei der Durchführung der Laborversuche.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ZUSAMMENSETZUNG UND EIGENSCHAFTEN BENTONITGEBUNDENER FORMSTOFFE .....</b>	<b>3</b>
2.1	ZIEL- UND EINFLUSSGRÖßEN .....	3
2.1.1	<i>Zusammensetzung des Formstoffs</i> .....	3
2.1.2	<i>Aufbereitungsintensität</i> .....	8
2.1.3	<i>Verdichtungsgrad</i> .....	9
2.2	PRÜFVERFAHREN ZUR CHARAKTERISIERUNG DER FORMSTOFFQUALITÄT .....	10
2.2.1	<i>Formstofffeuchte</i> .....	10
2.2.2	<i>Aktivtongehalt</i> .....	10
2.2.3	<i>Glanzkohlenstoffbildungsvermögen</i> .....	11
2.2.4	<i>Granulometrische Prüfwerte</i> .....	12
2.2.5	<i>Glühverlust, Kohlenstoffgehalt, Extrahierbare Anteile</i> .....	14
2.2.6	<i>Schüttdichte (<math>\rho_s</math>) und Verdichtbarkeit</i> .....	14
2.2.7	<i>Festigkeitseigenschaften</i> .....	15
2.2.8	<i>Gasdurchlässigkeit</i> .....	17
2.2.9	<i>Plastizität und Ausstoßkraft</i> .....	18
2.2.10	<i>Sinterbeginn (Sinterpunkt)</i> .....	19
<b>3</b>	<b>FORMSTOFFSTEUERUNG .....</b>	<b>20</b>
3.1	KONVENTIONELLE VERFAHREN DER FORMSTOFFSTEUERUNG .....	20
3.1.1	<i>Messung und Regelung der Formstoff-Feuchte</i> .....	20
3.1.2	<i>Messung und Regelung der Aktivbentonit- und Glanzkohlenstoffbildnerkonzentration</i> .....	22
3.2	PRÄVENTIVE FORMSTOFFSTEUERUNG .....	23
3.2.1	<i>Einflussgrößen</i> .....	23
3.2.2	<i>Vor- und Nachteile der präventiven Formstoffsteuerung</i> .....	25
3.3	ONLINE-STEUERUNG BZW. REGELUNG DER FORMSTOFFQUALITÄT .....	26
3.3.1	<i>Grundlage des Steuerungskonzepts</i> .....	26
3.3.2	<i>Automatisches Messgerät zur Online-Beurteilung des Formstoffs</i> .....	29
3.4	FUZZY-REGELUNG ZUR STEUERUNG DER WASSERZUGABE .....	30
3.5	EXPERTENSYSTEM ZUR BEURTEILUNG AUFTRETENDER GUSSEHLER .....	31
3.6	SIMULATION DES FORMSTOFFKREISLAUFS .....	35
<b>4</b>	<b>ERPROBUNG DES STEUERUNGSKONZEPTES.....</b>	<b>39</b>
4.1	BESCHREIBUNG DER BETEILIGTEN GIEBEREIEN .....	39
4.1.1	<i>Woeste, Velbert</i> .....	39
4.1.2	<i>Georg Fischer, Mettmann</i> .....	40
4.1.3	<i>AE Goetze, Burscheid</i> .....	41
4.2	VORVERSUCHE .....	42
4.2.1	<i>Einfluss der Verdichtung des Formstoffs</i> .....	42
4.2.2	<i>Einfluss der Bentonit-Sorte</i> .....	45
4.2.3	<i>Einfluss der Ionenkonzentration im Wasser bzw. Formstoff</i> .....	49
4.2.4	<i>Vergleich des Verdichtbarkeitsmessgerätes mit Laborprüfgeräten anhand von Prüfmischungen</i> .....	51
4.3	UNTERSUCHUNG DER BETRIEBSFORMSTOFFE DER BETEILIGTEN GIEBEREIEN .....	56
4.3.1	<i>Betriebsformstoff AE Goetze</i> .....	58
4.3.2	<i>Betriebsformstoff Georg Fischer</i> .....	62
4.3.3	<i>Betriebsformstoff Woeste</i> .....	66
4.4	PRAXISVERSUCHE .....	71
4.4.1	<i>Versuche in der Fa. Georg Fischer, Mettmann</i> .....	71
4.4.2	<i>Versuche in der Fa. Woeste, Velbert</i> .....	79
4.5	EINFÜHRUNG DES STEUERUNGSKONZEPTES BEI DER FA. WOESTE, VELBERT .....	83
4.5.1	<i>Einführung der vorbeugenden Formstoffsteuerung</i> .....	83
4.5.2	<i>Steuerung der Wasserzugabe</i> .....	89
4.5.3	<i>Steuerung der Bentonitzugabe</i> .....	94
<b>5</b>	<b>BEURTEILUNG DER ERGEBNISSE .....</b>	<b>97</b>

5.1	VERFAHRENSABLAUF ZUR EINFÜHRUNG DES STEUERUNGSKONZEPTES .....	98
6	ZUSAMMENFASSUNG .....	100
7	LITERATURVERZEICHNIS .....	101
8	ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	104
9	TABELLENVERZEICHNIS .....	107

# 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Das Gießen erlaubt von allen formgebenden Fertigungsverfahren die größte Gestaltungsfreiheit. Je nach der geforderten Gussstückart und -qualität kommen dabei eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren zur Herstellung der Gießformen zum Einsatz.

Zur Herstellung verloreener Formen wird dabei in den meisten Fällen ein tongebundener Formstoff eingesetzt. Im Vergleich zu anderen möglichen Formstoff- und Bindersystemen bieten tongebundene Formstoffe eine Reihe wichtiger Vorteile :

Ein tongebundener Formstoff kann ohne aufwendige Regenerierung im Kreislauf verwendet werden. Da die Bindung innerhalb der Form durch physikalische Kräfte erfolgt, kann sie durch mechanisches Zerkleinern der Form aufgehoben werden, wodurch der Formstoff nach dem Ersetzen verbrauchter Inhaltsstoffe erneut verwendet werden kann. Im Gegensatz dazu kann beim Einsatz chemischer Bindungsverfahren die Aushärtungsreaktion nicht rückgängig gemacht werden, so dass auch nach entsprechender Regenerierung oder Zerkleinerung erst durch erneute Zugabe der Binderkomponenten wieder ein gebrauchsfähiger Formstoff entsteht.

Die Komponenten tongebundener Formstoffe sind verhältnismäßig preiswert. Zusammen mit dem hohen Wiederverwendungsgrad des Formstoffs macht dies das Nassgussverfahren prädestiniert zur Fertigung großer Stückzahlen.

Auch die Entsorgung des Formstoffs ist vergleichsweise unproblematisch. Als Formgrundstoff wird meist Quarzsand benutzt, und auch die verwendeten Bindetone erlauben eine unproblematische Deponierung oder Weiterverwendung des Formstoffs. Allerdings können weitere notwendige Formhilfsstoffe, zum Beispiel organische Glanzkohlenstoffbildner, eine Verwendung oder Deponierung der Gießereireststoffe erschweren bzw. eine Vorbehandlung notwendig machen.

Die Verwendung tongebundener Formstoffe im Kreislauf erfordert eine Aufbereitungstechnik, die den nach dem Auspacken vorliegenden Formstoff zerkleinert, kühlt, und die verbrauchten Inhaltsstoffe so ersetzt, dass zur Herstellung neuer Formen ein Formstoff gleichmäßiger und ausreichender Qualität entsteht.

Es sind die unterschiedlichsten Verfahren bekannt, um bei bekannter Regelstrecke einen nach wählbaren Kriterien optimalen Regler zu entwerfen. Diese Verfahren stoßen bei der Steuerung der Formstoffaufbereitung aber schnell an ihre Grenzen. Eine Bestimmung aller Formstoff-Inhaltsstoffe ist in einem Zeitraum, der die Korrektur eventueller Schwankungen erlaubt, unmöglich. Daher muss man sich entweder auf Prüfungen in größeren Zeitabständen beschränken oder alternativ schnell und einfach messbare Formstoffkennwerte zur Steuerung heranziehen. Eine mathematische Beschreibung des Formstoffkreislaufs mit seinen Einzelaggregaten ist nur angenähert möglich. Insbesondere die Verzögerungen durch Transportvorgänge, z. B. auf Förderbändern, oder variable Verweilzeiten, z. B. in Bunkern bei unterschiedlicher Füllung, erlauben keine geschlossene mathematische Darstellung der Regelstrecke. Entsprechend kann eine Reglersynthese nur angenähert erfolgen, mit Konsequenzen für die erreichbare Regelungsgüte und Stabilität. Einen Ausweg kann dabei der Einsatz von Fuzzy-Regelalgorithmen bieten. Solche Regler sind robust, d. h. ihr Verhalten bleibt auch bei Veränderungen der Regelstrecke oder der Regelparameter vorhersagbar und stabil. Das Design und die Anpassung solcher Regler ist verhältnismäßig einfach möglich, wobei Erfahrungswissen der Anlagenbetreiber in die Reglerdefinitionen einfließen kann.

Trotzdem ist auch ein Fuzzy-Regler ein Steuerungsglied, das anhand von Sollwertvorgaben und aktuell gemessenen Prozessdaten die notwendigen Stellgrößen berechnen muss. Die Unmöglichkeit, z.B. die Aktivbentonitkonzentration, den Schlammstoffgehalt oder die Glanzkohlenstoffbildnerkonzentration im Betriebsformstoff als Eingangsgröße des Reglers zu benutzen, setzt jeder möglichen Regelung enge Grenzen. Daher sollen hier weitere Informationen zur Verbesserung der Regelungen genutzt werden. Für das hier entwickelte Regelungskonzept ergibt sich eine Reihe von ineinander verschachtelten Regelkreisen, die mit unterschiedlichen Genauigkeiten und Antwortzeiten zur Gesamtregelung beitragen (Abb. 1).

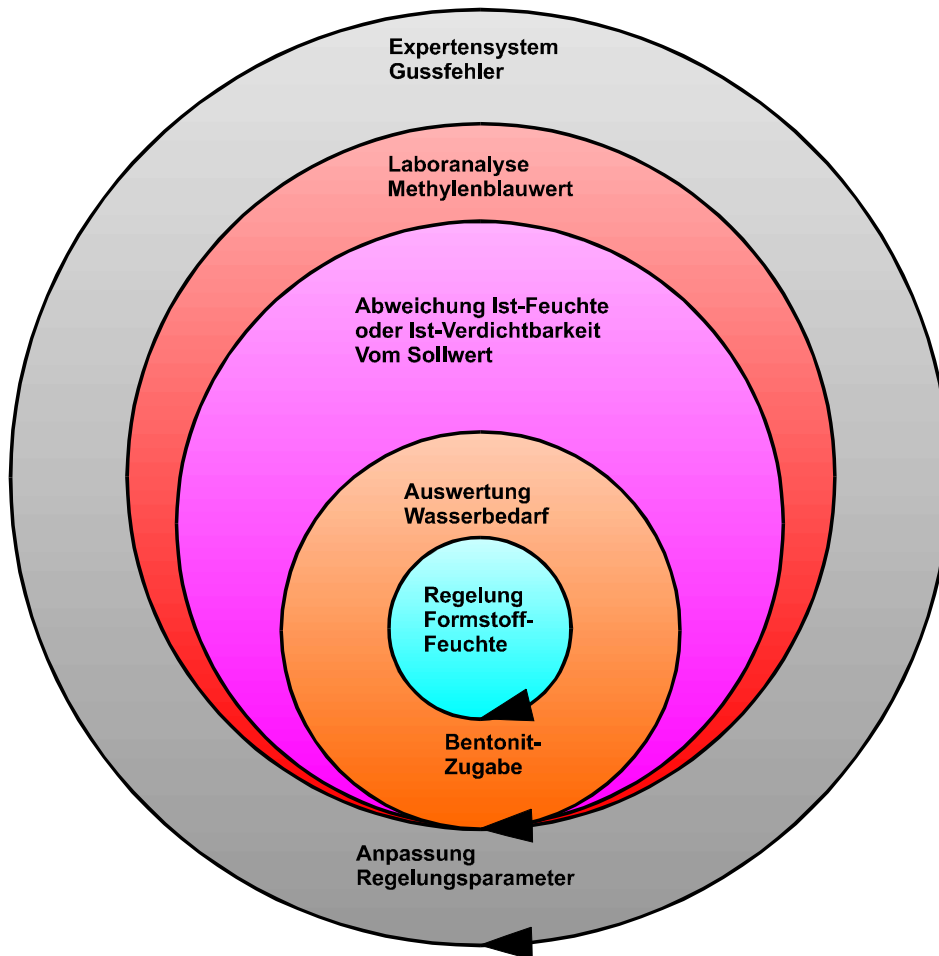


Abb. 1 : Regelkreise der Wasser- und Bentonitzugabe

Die Steuerung der Wasserzugabe ist dabei durch die Beurteilung jeder einzelnen Mischercharge notwendig. Zum einen hat die Wasserzugabe einen großen Einfluss auf die Formstoffqualität, zum anderen ist aber Eingangsfeuchte des Formstoffs nicht vorhersagbar, da sie, z. B. durch Stillstandszeiten und dadurch auftretenden Verweilzeiten auf Förderbändern, stark schwanken kann.

Die Auswertung der Parameter der Wasserzugabe (Altsandfeuchte bzw. -Verdichtbarkeit, berechnete und aktuelle Wasserzugabe) sowie der erreichten Formstoffkennwerte erlaubt dann Rückschlüsse auf den aktuellen Aktivbentonit- bzw. Schlammstoffgehalt des Formstoffsystems. Solch eine Auswertung ist aber nicht für eine einzelne Mischung möglich, sondern erfolgt als statistische Auswertung über mehrere Chargen. Laborbestimmungen z. B. des Schlammstoffgehalts oder der Aktivbentonitkonzentration, aber auch der Sieblinie, sind weiterhin notwendig und müssen in die Steuerung des Formstoffsystems einfließen, können aber eventuell in größeren Zeitintervallen erfolgen.

Eine weitere Kontrolle des Formstoffsystems und seines Einflusses auf die Gussstückqualität kann durch eine Auswertung der Gussfehler erfolgen. Dabei werden die Gussfehler statistisch erfasst und mit Hilfe eines Expertensystems möglichen formstoffbezogenen Fehlerursachen zugeordnet.

Eine regel- und steuerbare Formstoffaufbereitung ist heute im Sinne der Prozesssicherheit der Automobilindustrie noch nicht gegeben. Um am Markt bestehen zu können, ist eine flexible Reaktion auf Kundenwünsche notwendig, mit einer dadurch bedingten hohen Modellvielfalt und häufigen Modellwechseln. Dies bedingt dann bei der Produktion eine unterschiedliche Belastung des Formstoffs, was bei einer unbefriedigenden Regelung bei der erneuten Verwendung zur Erhöhung der Ausschussquote oder zumindest zur Verschlechterung der Gussqualität führt.

Das hier entwickelte Steuerungskonzept soll durch den Einsatz moderner regelungstechnischer und informationstechnischer Verfahren eine Verbesserung der Regelung erlauben. Durch die geringeren Schwankungen der Formstoffqualität kann eine gleichmäßige Gussstückqualität auf hohem Niveau, das den Anforderungen der Automobilindustrie genügt, erreicht werden.

## 2 Zusammensetzung und Eigenschaften bentonitgebundener Formstoffe

### 2.1 Ziel- und Einflussgrößen

Die Qualität jedes Formstoffs wird durch seine Zusammensetzung und seine Aufbereitung bestimmt. Wichtige Einflussgrößen dabei sind :

#### 2.1.1 Zusammensetzung des Formstoffs

##### a) Formgrundstoff

Als Formgrundstoffe beim Nassgussverfahren werden folgende Sande eingesetzt :

##### Quarzsand

Kostengünstig, erzeugt Sandausdehnungsfehler durch sprunghafte Wärmeausdehnung. Durch Thermoschock beim Abguss relativ starke Zerstörung der Quarzkörner.

##### Zirkonsand

gerundete Kornform, glatte Oberfläche, hohe Wärmeleitfähigkeit, geringe thermische Ausdehnung, hohe thermische Belastbarkeit

##### Olivinsand

eckige Kornform, hohe Wärmeleitfähigkeit, geringe thermische Ausdehnung, hohe thermische Belastbarkeit.

##### Chromitsand

hohe Packungsdichte, hohe Wärmeleitfähigkeit, geringe thermische Ausdehnung, hohe thermische Belastbarkeit.

	Quarzsand	Chromitsand	Zirkonsand	Olivinsand	Quelle
Dichte in g/cm <sup>3</sup>	2,65	4,4-4,6	4,6-4,7	3,25-3,4	/7/
Schüttdichte (vibriert) in g/cm <sup>3</sup>	1,52-2,00	2,9-3,1	3,01	2,05	/7/
Schmelzpunkt in °C	1723	2180	1900-1995	1760-1890	/7/
Spezifische Wärme c in J/(kg K)	715-1200	500-900	490-880	650-1250	/6/
Spezifische Wärmekapazität c bei 0-1200°C, in kJ/(kg K)	0,27	0,20	0,13	0,22-0,33	/7/
Wärmeleitfähigkeit λ in W/(m K)	0,2-0,7	0,3-0,5	-	0,5-1,0	/6/
Wärmeleitfähigkeit λ in W/(m K)	1,4	1,65	2,8	1,1	/7/
Temperaturleitfähigkeit a in m <sup>2</sup> /s	2-3 * 10 <sup>-6</sup>	3-4 * 10 <sup>-6</sup>	6-10*10 <sup>-6</sup>	3-4 * 10 <sup>-6</sup>	/6/
Wärmeeindringzahl b in J/(m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> K <sup>1</sup> )	600-900	1200	1500-1600	-	/6/
Therm. Längenausdehnungskoeffizient bei 0-1000°C, in mm/(mm K)	0,065	0,019	0,0013	0,031	/7/

Tab. 1 : Physikalische Eigenschaften verschiedener Formgrundstoffe

Normalerweise wird in einer Nassgussgießerei nur ein bestimmter Formgrundstoff eingesetzt. Der gewählte Formgrundstoff beeinflusst die Sollwerte der Sandaufbereitung und muss in den betriebsabhängigen Parametern der Sandaufbereitungs-Steuerung berücksichtigt werden.

## b) Bentonitqualität

Bentonite sind Tone vulkanischen Ursprungs, die zum Großteil aus dem Tonmineral Montmorillonit bestehen. Die Zusammensetzung variiert für die verschiedenen Vorkommen.

Montmorillonit :  $\text{Al}_2(\text{OH})_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}]\text{nH}_2\text{O}$  >75 %

Kaolinit :  $\text{Al}_4(\text{OH})_8[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$  6-8 %

Die physikalische Kenndaten gießereüblicher Bentonite sind :

Schüttgewicht : 0,72-0,92 g/cm<sup>3</sup>

Spez. Oberfläche : 300-500 m<sup>2</sup>/g

Der eingesetzte Bentonit soll folgende Eigenschaften entwickeln :

- Hohe Binefähigkeit im "grünen" Zustand (ausreichende Fließbarkeits-, Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften)
- Widerstandskraft gegen die Belastungen beim Gießvorgang (Ausdehnungs-/Schwindungsverhalten, Heißzugfestigkeit)
- Beständigkeit gegen thermische Belastungen (Totbrandverhalten)
- Verfügbarkeit in gleichmäßiger Qualität (Rohstoff / Wareneingangskontrolle)

Die Eigenschaften des Bentonits werden durch die vorliegende Ionenbelegung beeinflusst. Man unterscheidet dabei Natrium- und Kalzium-Bentonite. Ca-Bentonite können durch Aktivierung durch Soda in Na-Bentonite überführt werden. Dabei ändern sich die Gebrauchseigenschaften des Bentonits :

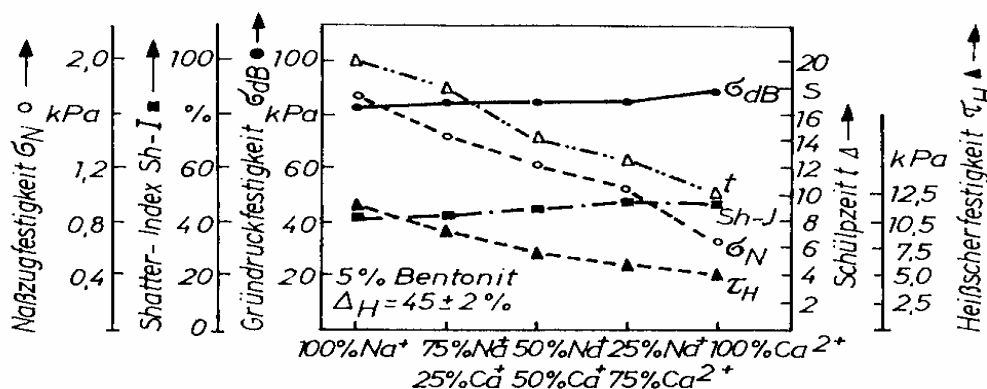


Abb. 2 : Einfluss der Na-Aktivierung des Bentonits auf die Formstoffkennwerte /6/

Der Einfluss einer Aktivierung auf die Grünkennwerte des Formstoffs ist gering. Das Hauptziel der Aktivierung liegt in der Verbesserung der Heißscherfestigkeit, Nasszugfestigkeit und damit der Schülplzeit, sowie in einer Verbesserung der thermischen Beständigkeit.

## c) Glanzkohlenstoffbildner

Glanzkohlenstoffbildner werden dem Formstoff zugesetzt, um die Benetzbarkeit der Formoberfläche zu vermindern. Dadurch wird die Penetrationsneigung verringert, und die Rauigkeit der Gussstückoberfläche wird reduziert. Im Allgemeinen wird ein Anteil im Formstoff von 1 bis 5 % angestrebt.

Meist erfolgt die Zugabe von Glanzkohlenstoffbildnern proportional zur Zugabe des Bentonits. Eine präventive Regelung des Glanzkohlenstoffbildneranteils kann über die Modellplattendaten erfolgen. Der Verbrauch an Glanzkohlenstoffbildnern ist abhängig vom Formstoff-Guss-Verhältnis und vom aktuellen Glanzkohlenstoffbildnergehalt im Formstoff.



#### d) Schlammstoffgehalt

Langfristig wird der Schlammstoffgehalt im Sandsystem durch das Verhältnis zwischen den eingebrachten Feinanteilen (Bentonit und Glanzkohlenstoffbildner) und Quarzsand bestimmt. Wegen der dann geringeren Empfindlichkeit auf Feuchteschwankungen ist ein hoher Schlammstoffanteil günstig, allerdings steigt dann die Gefahr von Gussfehlern. Ein hoher Schlammstoffgehalt führt zu einer Verringerung des mittleren Porendurchmessers und damit zu einer Verringerung der Gasdurchlässigkeit. Allgemein sollte mit 9-11% Schlammstoffgehalt gearbeitet werden. Eine Bestimmung des Schlammstoffgehalts erfolgt durch die Hebermethode oder Nasssiebung.

#### e) Wassergehalt (Formstofffeuchte)

Mit steigendem Wasseranteil nimmt die Klebneigung des Bindetons zu, das Schüttgewicht nimmt ab. Höhere Tonanteile (Schlammstoffanteile) und feuchtigkeitsbindende Bestandteile (Kohlenstaub, Quellbinder) erhöhen den Wasserbedarf, so dass eine bestimmte Schüttdichte bzw. Verdichtbarkeit erst bei einem höheren Wasseranteil erreicht wird. 1 % zusätzlicher Schlammstoff erfordert etwa 0,3 % mehr Wasser. Daher ist die Messung der absoluten Sandfeuchte zur Einstellung der Formstoffparameter nur bei Kenntnis der weiteren Sandkennwerte sinnvoll.

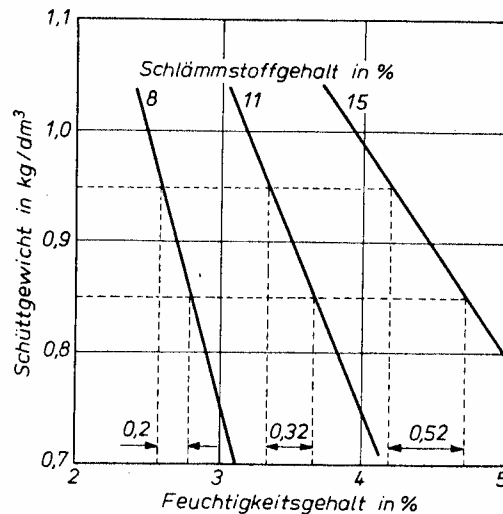


Abb. 3 : Einfluss des Schlammstoffgehaltes auf die Feuchtigkeitsempfindlichkeit des Formsandes /13/

Bei geringem Schlammstoffanteil hat eine Veränderung des Wasseranteils eine größere Wirkung auf das Schüttgewicht. Wenn zum Beispiel ein Bereich des Schüttgewichts von 0,85 bis 0,95 g/cm<sup>3</sup> zugelassen werden soll, ist bei einem Schlammstoffgehalt von 8 % die Wassermenge auf 0,2 % genau einzuhalten, bei 15 % Schlammstoffgehalt aber nur auf 0,52 %.

Fast alle Formstoffeigenschaften hängen vom Wassergehalt ab, in erster Linie Verdichtungsfähigkeit, alle Festigkeitseigenschaften und die Gasdurchlässigkeit.

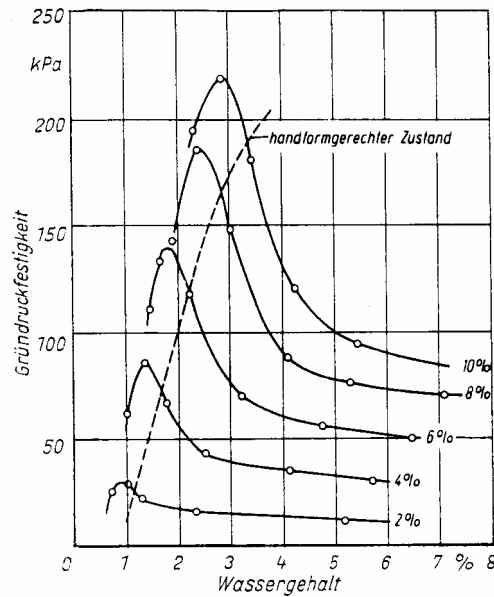


Abb. 4 : Einfluss des Binder- und Wassergehaltes auf die Gründruckfestigkeit /14/

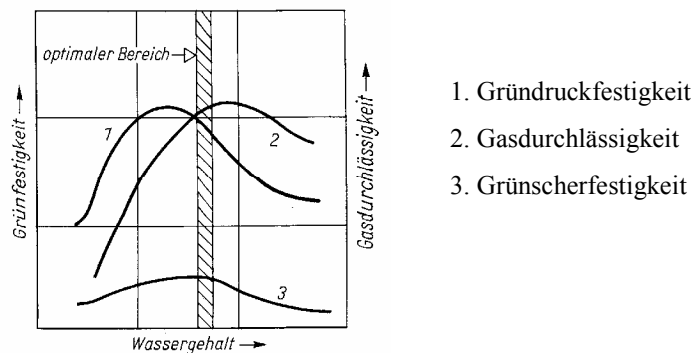


Abb. 5 : Einfluss des Wassergehaltes auf die wichtigsten Formstoffeigenschaften /9/

Wie diese Darstellung (Abb. 5) zeigt, werden die maximalen Eigenschaften bei unterschiedlichen Wassergehalten erreicht. Die Festlegung des optimalen Wassergehalts ist daher immer ein Kompromiss und muss an die Anforderungen an den Formstoff angepasst werden.

Der Wassergehalt des formgerechten Zustands entspricht dem Wassergehalt, der bei gleichen Verdichtungsbedingungen das Maximum der Gasdurchlässigkeit und das Minimum der Verdichtbarkeit ergibt.

Die Qualität des eingesetzten Wassers hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Formstoffs. Hohe Salzanteile im Wasser sowie saures oder basisches Wasser haben einen erhöhten Bentonitbedarf zur Folge.

### f) Salzgehalt

Die ständige Wasserzufuhr - zur Einstellung der Formstofffeuchte und zur Formstoffkühlung - führt zu einer Aufkonzentration von Salzen im Formstoff. Diese Salze beeinflussen die Nasszugfestigkeit nachteilig, wobei der Grad der Schädigung von der Salzkonzentration und -zusammensetzung im zugeführten Wasser abhängt. Im allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass Salze mit hoher Wasserlöslichkeit eine stärkere schädigendere Wirkung aufweisen /22/.

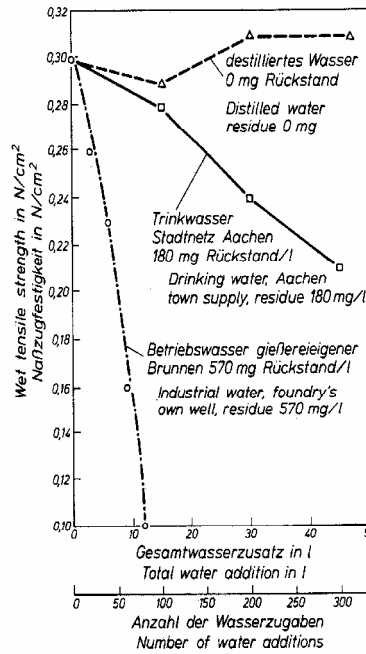


Abb. 6 : Die durch das Wasser eingeschleppten Elektrolyte sind für den Nasszugfestigkeitsabfall verantwortlich (5 kg Formsand mit 6 Gew.-Teilen Natriumbentonit) /22/  
Der Einfluss von Schadsalzen auf die Grünzugfestigkeit ist gering, auf die Gründruckfestigkeit nicht nachweisbar.

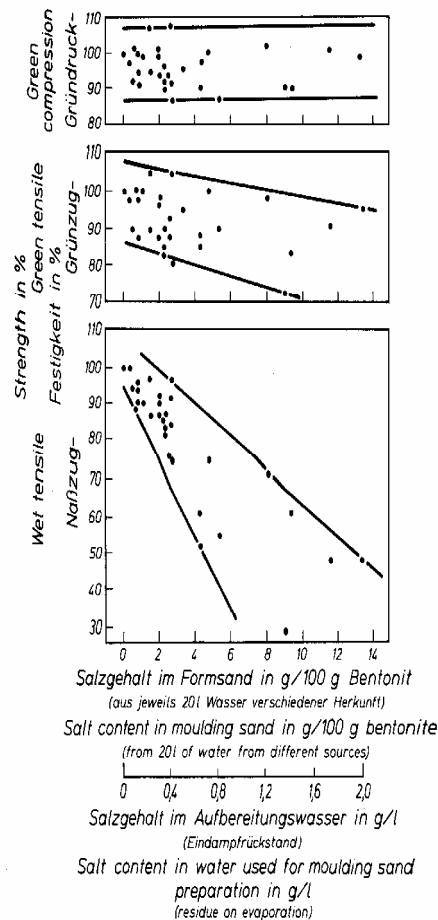


Abb. 7 : Die Gründruck- und Grünzugfestigkeit lassen eine Schädigung durch Salze im Formstoff nicht erkennen /22/

Eine Neutralisation der zugeführten Salze ist nicht möglich, deshalb können Salze im Formstoff nur durch eine Erhöhung des Auffrischungsgrades entfernt werden, oder es kann durch den Einsatz salzärmeren oder entsalzten Wassers der Salzeintrag reduziert werden.

### 2.1.2 Aufbereitungsintensität

Die Aufbereitungsintensität (Aufbereitungsgrad) hängt außer von der verwendeten Mischaggregaten im Wesentlichen von der Mischzeit ab. Meist wird aus Kostengründen und zum Erreichen der notwendigen Durchsatzmengen der Formstoff nicht bis zum Erreichen optimalen Eigenschaften aufbereitet. Die Bestimmung des Aufbereitungsgrades erfolgt durch die weitere Aufbereitung einer Formstoffprobe im Sandlabor und der Ermittlung der Änderung des Wasserbedarfs.

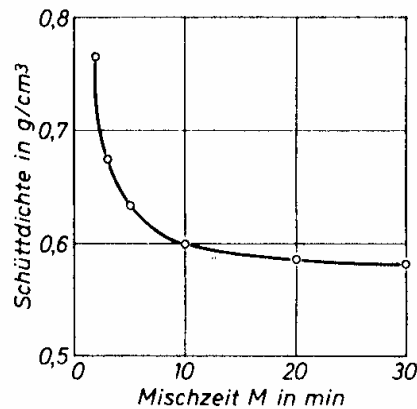


Abb. 8 : Einfluss der Mischzeit auf die Schüttdichte  
(und damit auf den Aufbereitungsgrad) /3/

Aufgrund einer Arbeitshypothese von Boenisch /23/ laufen bei der Formstoffaufbereitung folgende Schritte ab:

Beim Beginn der Aufbereitung kleben einzelnen Tonagglomerate an der Kornoberfläche. Durch die Knet- und Mischwirkung werden diese Tonteilchen dispergiert und umhüllen das Quarzkorn gleichmäßig. Dadurch steigt der Abstand zwischen den Quarzkörnern und damit die Gasdurchlässigkeit. Bei einer weiteren Aufbereitung wird die Oberfläche der Bindetonhülle wieder aufgeraut, so dass die Strömungswiderstände ansteigen und die Gasdurchlässigkeit wieder abfällt. In der Praxis wird die Aufbereitungszeit und damit die Aufbereitungsintensität so gewählt, dass dieser Bereich nicht erreicht wird.

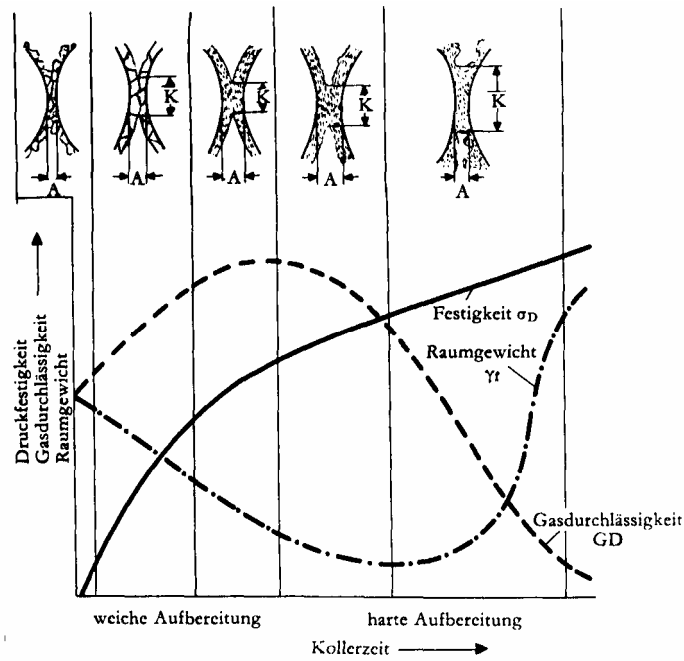


Abb. 9 : Abhängigkeit der Gaseigenschaften von der Aufbereitungintensität /6/

### 2.1.3 Verdichtungsgrad

Bei steigender Verdichtung des Formstoffs steigt die Packungsdichte, der mittlere Porendurchmesser wird geringer. Dadurch sinkt die Gasdurchlässigkeit ab.

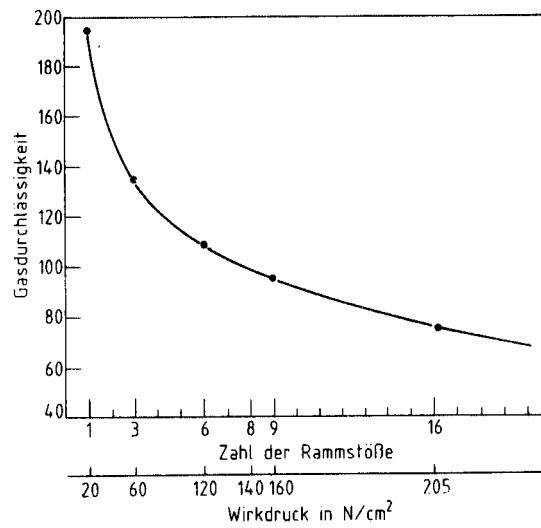


Abb. 10 : Abhängigkeit der Gasdurchlässigkeit von der Verdichtung /8/

## **2.2 Prüfverfahren zur Charakterisierung der Formstoffqualität**

### **2.2.1 Formstofffeuchte**

Die Bestimmung der Formstofffeuchte kann online erfolgen, wobei verschiedene Messverfahren zur Verfügung stehen :

- Messung der elektrischen Leitfähigkeit
- Messung der Dielektrizitätszahl
- Messung der Mikrowellenadsorption
- Messung von Kernphysikalischen Effekten

Alle diesen Messverfahren ist gemeinsam, dass sie die Wassermengen pro Volumeneinheit bestimmen, so dass zur Umrechnung in einen Wasseranteil in Gewichtsprozent die Schüttdichte des Formstoffs an der Messstelle entweder als konstant angenommen werden muss oder zusätzlich gemessen werden muss. Der Sollwert der Feuchtesteuerung bzw. -regelung muss aber an andere Sandkennwerte wie Bentonitanteil und Schlammstoffanteil angepasst werden.

Es existiert kein Messverfahren zur Bestimmung des formgerechten Wassergehaltes. Die Steuerung der Wasserdosierung erfolgt ersatzweise über die Regelung der Verdichtbarkeit oder der Formbarkeit (Compactibility/Moldability-Controller).

### **2.2.2 Aktivtongehalt**

Die Bestimmung des Aktivbentonitgehalts im Formstoff kann über die Methylenblaumethode erfolgen. Diese Methode ist relativ aufwendig und erfordert eine subjektive Beurteilung bei der Titration (alternativ photometrische Auswertung). Eine Automatisierung dieser Bestimmungsmethode ist nicht möglich. Die Methylenblauadsorption ist eine Komplexgröße, die eine gute Einschätzung der Bindefähigkeit erlaubt. Sie ist abhängig vom Montmorillonitgehalt, dem Gehalt an anderen Tonmineralien, der spezifischen Oberfläche und der Ionenaustauschfähigkeit.

Ein Nachweis des Aktivbentonitanteils kann über die Bestimmung der Druckfestigkeit bei konstanter Schüttdichte bzw. Verdichtbarkeit erfolgen. Eine Umrechnung für verschiedene Schüttdichten bzw. Verdichtbarkeiten ist möglich.

Zur direkten Bestimmung des Bentonitgehalts im Formstoff sind theoretisch mehrere Methoden denkbar :

- Eine Bestimmung der Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätskonstanten kann zur Ermittlung der OH-Gruppen bzw. der Wassermoleküle zwischen den Montmorillonit-Schichtpaketen benutzt werden. Dabei kann der Einfluss der Sandfeuchte durch eine Erhitzung über den Siedepunkt ausgeschaltet werden. Bei dieser Messung treten als Störeinflüsse z. B. die Korngrößenverteilung des Formstoffs und der Anteil an elektrisch leitendem Glanzkohlenstoffanteilen auf. Die Leitfähigkeitskomponente kann dabei durch eine Bestimmung des Phasenwinkels elektrisch kompensiert werden.
- Durch die Thermogravimetrie kann im Bereich von 300 bis 600 °C das Kristallwasser ausgetrieben werden, so dass der Gehalt an Kristallwasser und damit der aktive Bentonitgehalt bestimmt werden kann.

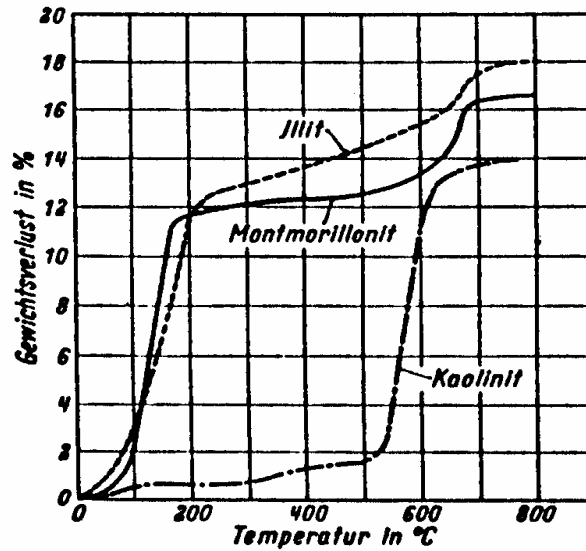


Abb. 11 : Thermogravimetrie von Tonmineralien /12/

- Bestimmung des Bentonitgehalts über die Dichte des Formstoffs. Wegen der Vielzahl von Quereinflüssen (Schüttdichte, weitere Zuschlagstoffe) ist dieses Verfahren in der Praxis unbrauchbar.

Bei den angesprochenen Messverfahren ist zu beachten, dass bei einer Beurteilung des Kreislaufsandes der Bentonitanteil nur bei ca. 1-10 % liegt, so dass die Empfindlichkeit kritisch ist. Der Aktivierungsgrad und die Quellfähigkeit wäre über keines der genannten Verfahren feststellbar.

Eine Kontrolle des Bentonitgehalts kann über eine Steuerung der von dem Bentonitgehalt abhängigen Formstoffkennwerte erfolgen. Dies kann z. B. über eine Bestimmung der Verdichtbarkeit, der Heißzugfestigkeit oder der Formbarkeit erfolgen (Online durch Compactibility- und Moldability-Controller).

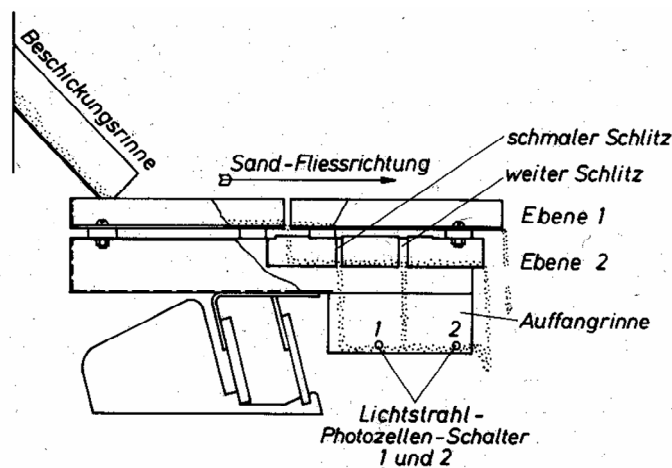


Abb. 12 : Moldability-Controller /14/

### 2.2.3 Glanzkohlenstoffbildungsvermögen

Eine direkte Bestimmung des Glanzkohlenstoffbildungsvermögens kann über eine spezielle Messapparatur erfolgen, in der die Abscheidung von Glanzkohlenstoff auf einer Quarzwollefüllung gravimetrisch bestimmt wird.

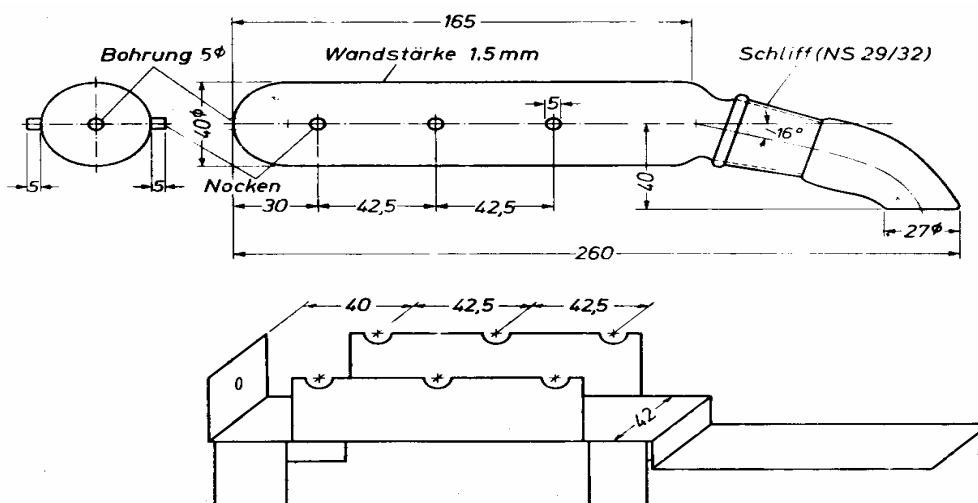


Abb. 13 : Gerät zur Glanzkohlenstoffbestimmung /24/

Eine näherungsweise Bestimmung kann über eine Bestimmung des Glühverlustes oder durch Extraktionsverfahren erfolgen. Diese Verfahren ermitteln aber den Gehalt an Glanzkohlenstoffbildnern im Formstoff, und nicht deren Wirksamkeit, d. h. die Menge des gebildeten Glanzkohlenstoffs.

## 2.2.4 Granulometrische Prüfwerte

### a) Korngrößenverteilung

Im Umlaufsand verändert sich die Korngrößenverteilung durch die thermische Beanspruchung beim Abguss und durch mechanische Beanspruchungen bei der Formstoffaufbereitung, beim Formprozess, beim Auspacken und bei der Sandaufbereitung. Eine weitere Beeinflussung erfolgt durch Neusandzugaben bzw. durch die Formsandauffrischung durch den zugeführten Kernsand. Die thermischen und mechanischen Einflüsse führen zu einer langsamen Verringerung der mittleren Korngröße.

Die Korngrößenverteilung beeinflusst

- die Gasdurchlässigkeit der Form (Änderung des Lückenvolumens)
- die Formstabilität (Änderung der spezifischen Kornoberfläche)
- die Gussstückqualität (Oberflächengüte)
- die Neigung zu bestimmten Gussfehlern (Blattrippen, Penetration)
- die Abkühlgeschwindigkeit (Änderung der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Formstoffs)

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung erfolgt über Kaskaden-Siebanalyse.

Eine Korrektur der Korngrößenverteilung erfolgt im allgemeinen durch die Steuerung der Neusandzugabe. Ein gezieltes Entfernen bestimmter Kornfraktionen durch Siebung oder Sichtung ist möglich, führt aber immer auch zu einem ungewollten Verlust an Bentonit und Glanzkohlenstoffbildnern, und wird daher selten durchgeführt.

Zur Beurteilung der Korngrößenverteilung werden im allgemeinen die folgenden Kenngrößen herangezogen. Dabei erfolgt eine Abtrennung der Teilchen  $<0,02\text{mm}$  durch Schlämmen (Sedimentation) worauf eine Zerlegung der restlichen Kornfraktionen mittels Kaskaden-Siebung erfolgt.

#### Mittlere Korngröße (MK): /17/

Der Korndurchmesser, der einem Siebdurchgang von 50% entspricht

#### Gleichmäßigkeitsgrad (GG): /17/

Berechnet aus der Differenz der prozentualen Massenanteile zwischen  $3/4$  MK und  $2/3$  MK.



**theoretische spezifische Oberfläche ( $S_{th}$ ) : /17/**

Berechnet aus den einzelnen Kornfraktionen, unter der Annahme kugelförmiger Körner

**wirkliche spezifische Oberfläche ( $S_w$ ) : /17/**

Gemessen nach dem Durchströmungsverfahren, als Funktion der Durchlässigkeit eines Kornhaufenwerkes. Ergibt die Oberfläche, die sich aus der Geometrie der Körner ergibt.

**wirkliche spezifische Oberfläche ( $S_{BET}$ ) : /17/**

Gemessen mittels Gasadsorption - BET-Verfahren. Im Gegensatz zur Durchströmmethode werden dabei auch die inneren Oberflächen erfasst.

**Eckigkeitsgrad (E) : /17/**

Verhältnis zwischen wirklicher spezifischen Oberfläche ( $S_w$ ) und theoretischer spezifischen Oberfläche ( $S_{th}$ ). Ergibt ein Maß für die Kornform eines Haufwerkes.

**Repräsentativer Korndurchmesser ( $G_d$ )**

**Abweichung vom Gleichkugelhauwerk ( $AG_{KH}$ )**

**AFS-Feinheitsnummer :**

Alternativ wird zur Beschreibung der mittleren Korngröße die AFS-Feinheitsnummer benutzt.

$AFS-Nr \approx S_{th} * 0,57.$

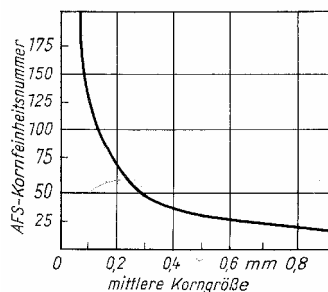


Abb. 14 : Näherungsweise Zusammenhang zwischen mittlerer Korngröße und AFS-Feinheitsnummer /6/, nach /17/

**Gasdurchlässigkeit (GD)**

Die Gasdurchlässigkeit hängt von den granulometrischen Eigenschaften wie Korngrößenverteilung und Kornform ab.

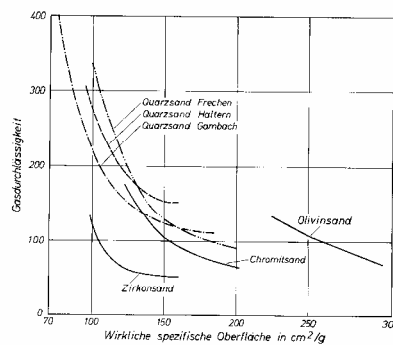


Abb. 15 : Zusammenhang zwischen Gasdurchlässigkeit und wirklicher spezifischer Oberfläche für verschiedene Quarzsande /17/

**b) Kornoberfläche**

Die Bestimmung der Kornoberfläche erfolgt durch eine subjektive Beurteilung unter dem Auflicht-Stereomikroskop bei 30- bis 60-facher Vergrößerung. Es werden die Oberflächen nach glatt, rau und

zerklüftet /18/ (glatt, rissig, porös, schrundig nach /17/) unterschieden, durch subjektiven Vergleich mit Referenzphotographien.

### c) Kornform

Die Kornform wird im allgemeinen in die Klassen rund, kantengerundet, eckig und splittrig eingeteilt, die Kornoberflächenbeschaffenheit in die Klassen glatt, glatt mit Unebenheiten, rau, zerklüftet und stark zerklüftet. Die Kornform und die Kornoberflächenbeschaffenheit beeinflussen die spezifische Oberfläche und damit den Wasser- und Bindetonbedarf.

Die Bestimmung erfolgt durch manuelle Auswertung mikroskopischer Aufnahmen. Die Bestimmung der spezifischen Oberfläche kann durch eine Bestimmung des Adsorptionsvermögens oder der Gasdurchlässigkeit erfolgen.

Eine Korrektur dieser Kennwerte im Sandkreislauf erfolgt normalerweise nicht. Durch die Auffrischung des Kreislaufsands durch Neu- und Kernsand mit konstanter Kornform und Kornoberflächenbeschaffenheit stellt sich ein Beharrungszustand ein. Die Kenntnis dieser Sandkennwerte ist aber zur Steuerung des Sandkreislaufs notwendig, da sie einen Einfluss auf die notwendigen Hilfsstoffkonzentrationen haben.

### d) Korngefüge

Das Korngefüge beschreibt den kristallinen Aufbau des Einzelkorns als mono- oder polykristallines Korn. Die Bestimmung erfolgt durch die Beurteilung eines Dünnschliffs unter dem Polarisationsmikroskop.

## 2.2.5 Glühverlust, Kohlenstoffgehalt, Extrahierbare Anteile

Zur Bestimmung des Gesamt-Glühverlustes wird eine Probe unter oxidierender Atmosphäre geglüht und der prozentuale Gewichtsverlust ermittelt. Dabei werden vorwiegend die verglühbaren Anteile der Kohlenstoffträger, das Kristallwasser des Bindetons und das CO<sub>2</sub> aus Karbonaten erfasst /19/.

Die Bestimmung des Kohlenstoffgehalts erfolgt durch Oxidation einer Probe im Röhrenofen und Bestimmung des dabei entstehenden Kohlendioxids. Es werden die Kohlenstoffanteile aus organischen und anorganischen Bestandteilen erfasst /19/.

Zur Bestimmung der extrahierbaren Anteile im Formstoff werden in einem Extraktionsapparat mit Hilfe organischer Lösemittel die löslichen Bestandteile entfernt und der Gewichtsverlust bestimmt. Es werden dabei die organischen Bestandteile erfasst, die im jeweiligen Lösemittel löslich sind /19/.

## 2.2.6 Schüttdichte ( $\rho_s$ ) und Verdichtbarkeit

Die Schüttdichte ist abhängig von der Korngrößenverteilung, Kornform, Kornoberfläche und stofflichen Zusammensetzung. Die Schüttdichte nimmt mit kleiner werdender spezifischer Oberfläche zu /17/. Alternativ wird auch das Schüttvolumen als Kehrwert der Schüttdichte benutzt. Bei tongebundenen Formstoffen wird die Schüttdichte neben der Verdichtbarkeit zur Bestimmung der Formbarkeit herangezogen. Zur Bestimmung der Schüttdichte wird ein zylindrischer Behälter von 1000 cm<sup>3</sup> Rauminhalt durch Einsieben einer Formstoffprobe gefüllt, die Oberseite abgestrichen und dann der Behälter mit Inhalt gewogen.

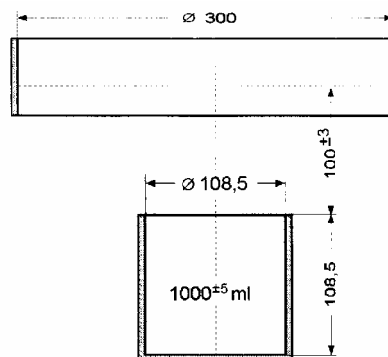


Abb. 16 : Vorrichtung zur Bestimmung der Schüttdichte /20/

Zur Bestimmung der Verdichtbarkeit wird ein Prüfröhr von 100 mm Länge und 50 mm Durchmesser mit dem Formstoff gefüllt und mit  $100 \text{ N/cm}^2$  verdichtet. Die Höhenabnahme der Probe ist dann die Verdichtbarkeit in %.

Verdichtbarkeit und Schüttgewicht sind voneinander abhängig. Ein Formstoff geringer Schüttdichte lässt sich besser verdichten, so dass seine Verdichtbarkeit hoch ist. Ein Formstoff mit höherer Schüttdichte erreicht nach dem Füllen des Prüfbehälters eine höhere Packungsdichte, so dass die erreichbare Verdichtbarkeit geringer ist.

## 2.2.7 Festigkeitseigenschaften

Eine wichtige Eigenschaft einer Nassgussform ist ihre Festigkeit. Jede Form ist beim Abheben vom Modell, Einlegen der Kerne, beim Abguss, aber auch beim sonstigen Handling unterschiedlichen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Entsprechend wurde eine Anzahl unterschiedlicher Kenngrößen definiert, die die Widerstandsfähigkeit gegenüber diesen Belastungen beschreiben

### a) Gründruckfestigkeit

Der Prüfkörper wird zwischen zwei Druckscheiben gelegt und belastet. Die beim Bruch des Prüfkörpers gemessene Kraft, bezogen auf den Querschnitt, wird als Gründruckfestigkeit in  $\text{N/cm}^2$  angegeben.

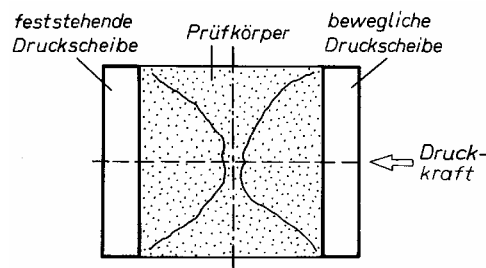


Abb. 17 : Druckfestigkeitsprüfung (schematisch) /21/

### b) Grünzugfestigkeit

Zur Bestimmung der Grünzugfestigkeit wird ein Prüfkörper in einem Prüfröhr mit Messkopf hergestellt und auf Zug belastet. Die beim Abriss des Prüfkörpers angezeigte, auf den Querschnitt bezogene Kraft ist die Grünzugfestigkeit in  $\text{N/cm}^2$ .

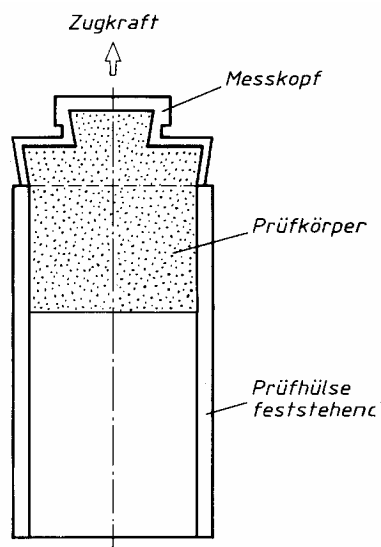


Abb. 18 : Grünzugfestigkeitsprüfung (schematisch) /21/

### c) Scherfestigkeit

Der Prüfkörper wird zwischen Schereinsätze gelegt und belastet. Die beim Bruch gemessene Kraft, bezogen auf die Fläche der in der Achse des Prüfkörpers liegende Ebene, wird als Scherfestigkeit in  $\text{N}/\text{cm}^2$  angegeben.

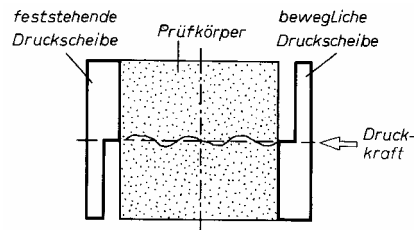


Abb. 19 : Scherfestigkeitsprüfung (schematisch) /21/

Genauere Ergebnisse erhält man mit Hilfe der Doppelquer-Schervorrichtung.

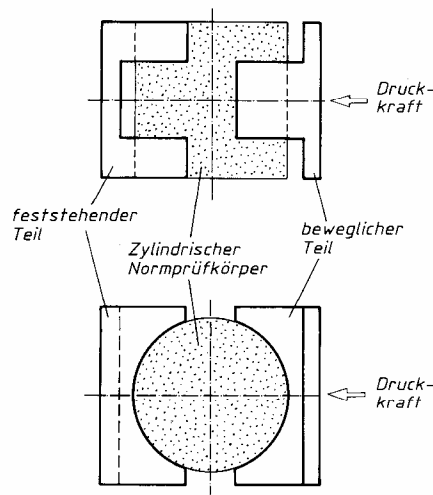


Abb. 20 : Doppelquer-Schervorrichtung (schematisch) /21/

### d) Spaltfestigkeit

Der Prüfkörper wird quer zu seiner Achse zwischen zwei Druckscheiben belastet. Die beim Bruch abgelesene, auf den Querschnitt bezogene Kraft wird als Spaltfestigkeit bezeichnet und in  $\text{N}/\text{cm}^2$  angegeben.

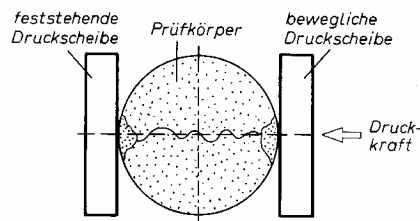


Abb. 21 : Spaltfestigkeitsprüfung (schematisch) /21/

### e) Trockendruckfestigkeit

Die Bestimmung der Trockendruckfestigkeit erfolgt analog zur Gründruckfestigkeit, allerdings wird der Prüfkörper bei  $150^\circ\text{C}$  bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

### f) Nasszugfestigkeit

Der zu prüfende Formstoff wird im Prüfkörperrohr mit aufgesetztem Prüfkörpererring verdichtet. Durch Aufsetzen einer Heizplatte wird der Prüfkörper im Bereich des Prüfkörperings erhitzt, und anschließend wird die Trennstelle Prüfkörperrohr/Prüfkörpererring auf Zug belastet. Die beim Abriss gemessene, auf den Querschnitt bezogene Kraft ist die Nasszugfestigkeit in  $\text{N}/\text{cm}^2$ .

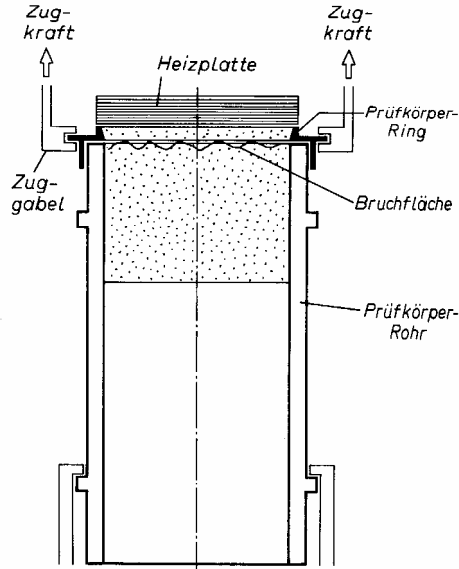


Abb. 22 : Nasszugfestigkeitsprüfung (schematisch) /21/

### 2.2.8 Gasdurchlässigkeit

Je feiner ein Sand ist, um so geringer ist seine Gasdurchlässigkeit.

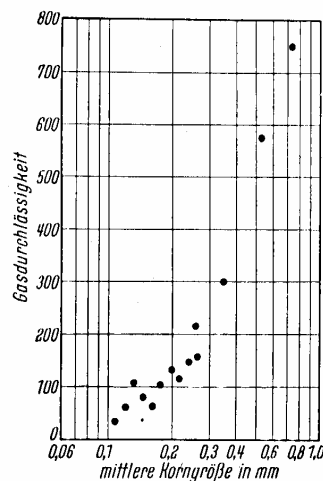


Abb. 23 : Abhängigkeit der Gasdurchlässigkeit von der mittleren Korngröße /14/

Außerdem wird die Gasdurchlässigkeit durch die Korngrößenverteilung beeinflusst. Während die Gasdurchlässigkeit bei Vorliegen einer einzigen Korngröße verhältnismäßig hoch ist, sinkt sie bei einer breiteren Streuung der Korngrößen ab, da dann durch kleinere Kornfraktionen die Lückenvolumen zwischen den größeren Körnern aufgefüllt werden.

Wegen der Abhängigkeit der Gasdurchlässigkeit von der Verdichtung und wegen der ungleichmäßigen Verdichtung jeder Form kann keine definierte Gasdurchlässigkeit über die gesamte Formoberfläche erreicht werden. Die Gasdurchlässigkeit wird meist nur zur Überwachung der Sandkornung und damit der Gussstückoberflächenqualität benutzt.

Zur Bestimmung der Gasdurchlässigkeit wird ein Normprüfkörper in ein spezielles Gasdurchlässigkeitsmessgerät eingespannt. Die so ermittelte Gasdurchlässigkeitszahl gibt an, wie viele  $\text{cm}^3$  Luft einen Sandkörper von  $1 \text{ cm}^2$  Querschnitt und  $1 \text{ cm}$  Dicke bei einer Druckdifferenz von  $1 \text{ mBar}$  in  $1 \text{ min}$  durchströmen.

### 2.2.9 Plastizität und Ausstoßkraft

Gemessen wird die Kraft, die zum Eindringen eines Kegels in den Normprüfkörper notwendig ist. Es ergeben sich dabei nur geringe Abweichungen zur Druckfestigkeit, so dass dieses Verfahren keine weiteren Daten liefern kann.

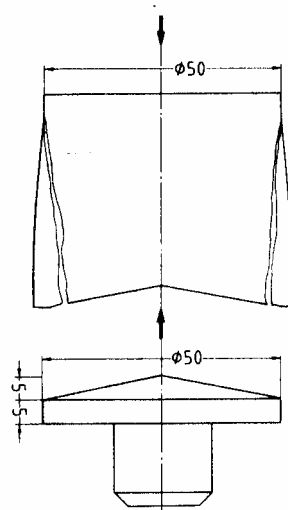


Abb. 24 : Prüfverfahren zur Messung der Formstoffplastizität /8/

Als Ausstoßkraft oder Ausschubkraft bezeichnet man die Kraft, die zum Ausschieben des Prüfkörpers aus dem Prüfkörperrohr notwendig ist. Die Ausstoßkraft wird im wesentlichen durch die Gründruckfestigkeit bestimmt, ist aber auch von der Oberfläche bzw. der Oberflächenbehandlung des Prüfkörperrohres abhängig.

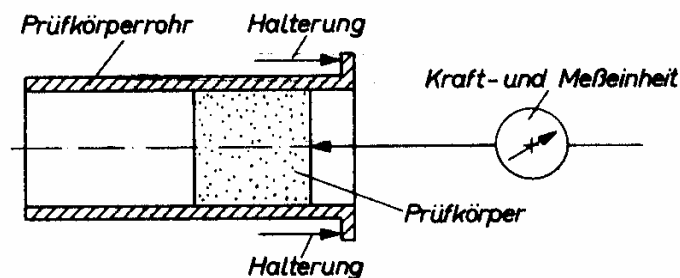


Abb. 25 : Prüfverfahren zur Messung der Ausstoßkraft /8/

Das Verfahren liefert im Vergleich zur Bestimmung der Gründruckfestigkeit keine weitergehenden Aussagen und hat deshalb keine Verbreitung gefunden.

Die Ausstoßkraft steigt mit steigender Gründruckfestigkeit, Kohlenstäube verringern die Ausschubkraft. /16/

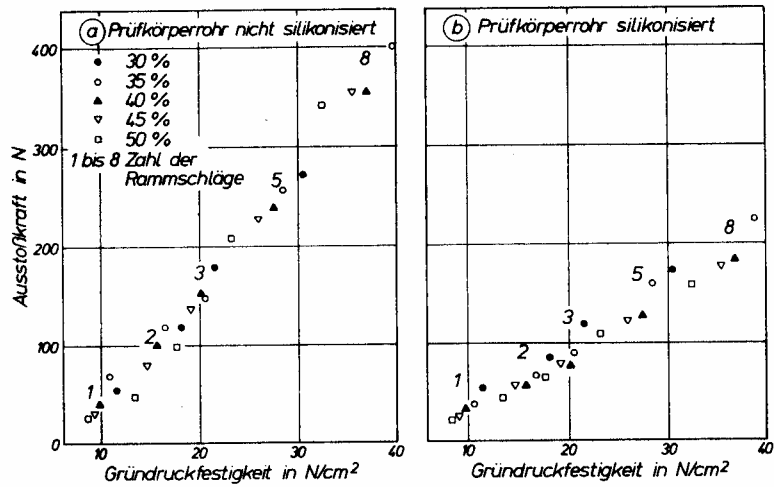


Abb. 26 : Ausstoßkraft und Gründruckfestigkeit bei Betriebsanden unterschiedlicher Feuchte und Verdichtung /8/

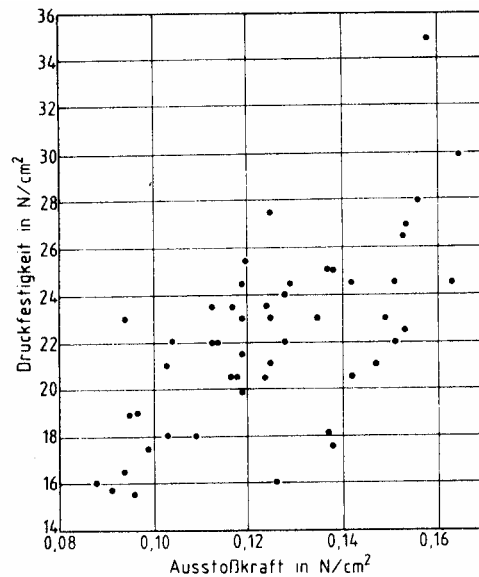


Abb. 27 : Abhängigkeit zwischen Druckfestigkeit und Ausstoßkraft bei 52 Betriebsanden /8/

Ein mögliches Einsatzgebiet liegt in der Beurteilung von Trennmitteln.

### 2.2.10 Sinterbeginn (Sinterpunkt)

Zur Kennzeichnung des Sinterbeginns wird die Verklebung der einzelnen Quarzkörnchen bei Temperatureinwirkung und das danach veränderte Fließverhalten der Probe benutzt. Hierzu wird die Probe in einem Porzellanschiffchen erhitzt. Der Sinterbeginn ist erreicht, wenn beim Wenden des abgekühlten Schiffchens mehr als zwei Drittel des Inhalts haften bleiben.

## 3 Formstoffsteuerung

### 3.1 Konventionelle Verfahren der Formstoffsteuerung

Ziel der Formstoffsteuerung ist immer das Ausregeln der unvermeidlichen Schwankungen der Formstoffzusammensetzung und damit der Formstoffeigenschaften. Dazu kommt eine Kombination von Online-Regelkreisen (z. B. zur Steuerung der Wasserdosierung) und Laboranalysen zur langfristigen Überwachung zum Einsatz. Der Einsatz einer vorbeugenden Formstoffsteuerung, d. h. die Nutzung bekannter Daten der Produktionsmittel zur Prognose der Formstoffschwankungen und damit zu deren Ausgleich ist Stand der Technik und seit mehreren Jahren im Einsatz. Nur durch den Einsatz einer vorbeugenden Formstoffsteuerung ist allerdings keine befriedigende Regelung der Formstoffqualität zu erreichen. Es wird immer eine permanente Kontrolle der Formstoffparameter benötigt, um Schwankungen auszugleichen bzw. langfristig die angestrebte Formstoffzusammensetzung einzuhalten.

Um diese unvermeidlichen Schwankungen auszugleichen, ist eine Beurteilung jeder einzelnen Charge wünschenswert, um z. B. bei der Formstoffaufbereitung im Mischer die entsprechenden aktuellen Zugabemengen an Wasser, Bentonit und Glanzkohlenstoffbildnern zu ermitteln. Zur Ermittlung des Aktivbentonit- bzw. Glanzkohlenstoffgehalts im Formstoff ist allerdings kein direktes Messverfahren bekannt, das ein Messergebnis so schnell liefern kann, dass eine Korrektur vor oder während der Aufbereitung der Charge erlauben würde.

#### 3.1.1 Messung und Regelung der Formstoff-Feuchte

Zur Bestimmung der Formstoff-Feuchte werden eine Vielzahl unterschiedlicher Messverfahren eingesetzt, die die physikalischen Eigenschaften des im Formstoff befindlichen Wassers ausnutzen. Einige der benutzten Messverfahren sind :

- **Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit des Formstoffs**

Dazu werden Elektroden in Kontakt mit dem Formstoff gebracht, und mit Hilfe eines Messstroms wird die Leitfähigkeit zwischen diesen Elektroden bestimmt. Meist werden Plattenelektroden benutzt, die in den Formstoff auf einem Förderband eintauchen, oder selbstreinigende Stabelektroden, die zur Messung in einen Formstoffbunker einfahren. Da die Leitfähigkeit temperaturabhängig ist, ist immer eine parallele Messung der Formstofftemperatur notwendig.

Um eine Beschädigung der Elektroden durch Elektrolyseeffekte zu vermeiden, muss zur Messung eine Wechselspannung benutzt werden. Die Frequenz wird so gewählt, dass kapazitive Effekte vernachlässigt werden können, meist im Bereich von ca. 1 kHz.

Da zur Messung ein elektrischer Strom durch den Formstoff fließen muss, ist ein ausreichender Kontakt zwischen Elektroden und Formstoff notwendig. Verschmutzungen der Elektroden z. B. durch nichtleitende Oxide oder durch Anbackungen verfälschen die Messung stark. So kann eine sehr dünne Schicht trockenen Formstoffs auf einer Elektrode den Stromfluss praktisch blockieren. Auch Luftspalte, die im Formstoff durch seine Bewegung auftreten können, bilden ein Hindernis für den Stromfluss und verfälschen daher die Messung, wenn sie quer zur Richtung des Stromflusses liegen, parallel zum Stromfluss beeinflussen sie die Messung dagegen nicht.

- **Bestimmung der Dielektrizitätszahl des Formstoffs**

Wasser besitzt durch seinen polaren Molekulaufbau eine hohe Dielektrizitätszahl von 81,6. Diese ist bedeutend höher als die Dielektrizitätszahl von Quarz (ca. 4) oder anderer Formstoff-Inhaltsstoffe, so dass die Dielektrizitätszahl des Formstoff-Gemisches wesentlich von dem Wasseranteil abhängt.

Zur Bestimmung der Dielektrizitätszahl kann die Elektrodenanordnung wie zur Leitfähigkeitsbestimmung benutzt werden, allerdings erfolgt die Messung bei höheren Frequenzen, so dass der Strom durch die Elektroden im wesentlichen durch den kapazitiven Anteil des Leitwertes bestimmt wird. Der resistive Anteil wird dabei entweder vernachlässigt, oder kann durch entsprechende schaltungstechnische Maßnahmen (Synchrongleichrichtung) kompensiert werden.

Auch die Dielektrizitätszahl ist temperaturabhängig, so dass eine Bestimmung der Formstofftemperatur zur Temperaturkompensation notwendig ist.



- **Bestimmung der Formstoff-Feuchte durch Adsorption von Mikrowellen**

Bei diesem Messverfahren wird der polare Aufbau der Wassermoleküle ausgenutzt. Durchdringen elektromagnetische Wellen mit Frequenzen von ca. 10 GHz den Formstoff, werden die Wassermoleküle zu Schwingungen angeregt, was zu einer Dämpfung führt. Diese Dämpfung wird entweder durch eine Messung der Wellenintensität nach dem Durchtritt durch den Formstoff bestimmt, oder ein einzelner Messkopf koppelt einen Teil der erzeugten Wellen in den Formstoff ein, wobei unterschiedliche Formstoff-Feuchten eine unterschiedliche Bedämpfung des Generators bewirken.

Allen diesen Messverfahren ist gemeinsam, dass eine Kalibrierung der Messgerätes auf die Anordnung der Sensoren und den betrachteten Formstoff erfolgen muss.

Einen großen Einfluss auf die Kalibrierung hat dabei die geometrische Anordnung der Sensoren. Abstand und Fläche der Sensoren bestimmen das Messvolumen und damit den Zusammenhang zwischen den gemessenen Größen wie der Leitfähigkeit oder Kapazität zwischen den Elektroden und den Stoffgrößen des Formstoffs wie seinem spezifischen Widerstand oder seiner Dielektrizitätszahl. Durch einen entsprechend mechanisch stabilen Aufbau der Sensoren kann eine Veränderung dieser Werte weitgehend verhindert werden, so dass ein einmaliger Abgleich ausreichend ist. Problematisch kann allerdings die Messung auf Förderbändern sein, da durch unterschiedliche Schichtdicken die effektive Elektrodenfläche schwanken kann, wenn die Elektroden nicht vollständig in den Formstoff eintauchen.

Während der Einfluss der Sensoranordnung durch eine einmalige Kalibrierung ausgeglichen werden kann, ist der Einfluss der Formstoffzusammensetzung nicht so einfach zu erfassen bzw. zu korrigieren. Allen betrachteten Messverfahren ist gemeinsam, dass sie abhängig von der Packungsdichte (Schüttdichte) des Formstoffs sind. Wird bei konstanter Formstoff-Feuchte (als Gewichtsverhältnis der Wassermenge zur Gesamtmenge des Formstoffs) der Formstoff verdichtet, so gelangt eine größere Wassermenge in das betrachtete Messvolumen, was zu einer Änderung der gemessenen Größen führt.

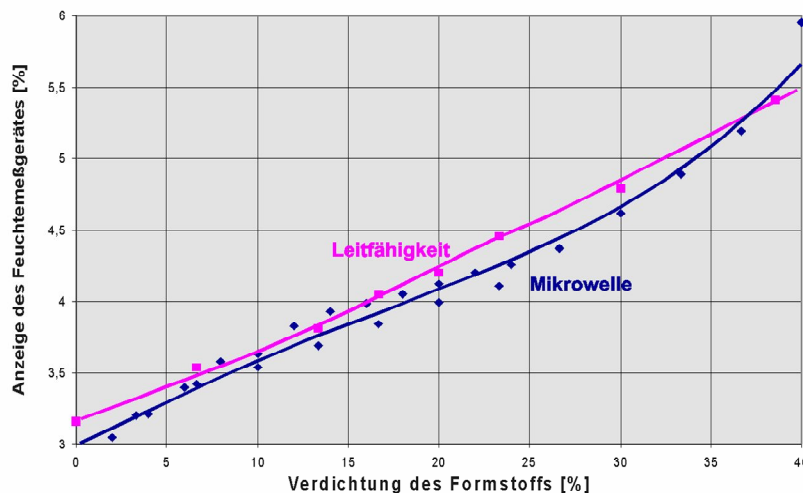


Abb. 28 : Abhängigkeit von Feuchtemesseinrichtungen von der Schüttdichte des Formstoffs, Beschreibung der Versuchsdurchführung siehe Kap. 4.2.1

Die Schüttdichte, die sich beim Transport bzw. bei der Lagerung des Formstoffs einstellt, ist dabei aber abhängig unter anderem von der Formstoff-Feuchte, der Formstofftemperatur, der Aktivbentonitkonzentration, sowie der Korngrößenverteilung im Formstoff. Diese Einflüsse führen dazu, dass bei Änderungen der Formstoffzusammensetzung die Feuchtemesseinrichtungen nachkalibriert werden müssen.

Der gemessene Wert der Formstoff-Feuchte wird zur Berechnung der Wasserzugabe im Mischer benutzt. Dazu wird eine Soll-Feuchte vorgegeben, und aus der Differenz zwischen Soll- und Ist-Feuchte sowie der Chargengröße des Mixers kann die Wassermenge berechnet werden. Meist wird abhängig von der Formstofftemperatur mehr Wasser, als zum Ausgleich der Differenz notwendig ist, zugegeben, um die Austrocknung des aufbereiteten Formstoffs beim Transport zur Formanlage auszugleichen.

Die Soll-Feuchte des Formstoffs ist allerdings nicht konstant. Zum einen hängt sie von der verwendeten Formanlagentechnik ab, aber auch von den zu fertigenden Produkten, den eingesetzten Modellplatten usw.

Die Herstellung einer einwandfreien Form und damit eines fehlerfreien Gussstücks erfordert dabei die Einhaltung mehrerer Formstoffparameter in engen Grenzen. Dazu gehört insbesondere die Verdichtbarkeit des Formstoffs, aber auch die Fließfähigkeit oder die Festigkeit der Form. Um diese Werte im optimalen Bereich zu halten, ist dabei, abhängig von Formstoffparametern wie Schlammstoffgehalt, Aktivbentonitkonzentration oder Formstofftemperatur, eine unterschiedliche Formstoff-Feuchte notwendig.

Eine einmal eingestellte Soll-Formstofffeuchte kann daher auch bei einwandfreier Messtechnik keine gleichmäßige Formqualität und damit Gussstückqualität sicherstellen. Die unvermeidbaren Schwankungen der Formstoffzusammensetzung erfordern eine permanente Anpassung der Soll-Formstofffeuchte. Dies erfolgt im allgemeinen manuell aufgrund verbaler Rückmeldungen der Formanlagenbediener.

### **3.1.2 Messung und Regelung der Aktivbentonit- und Glanzkohlenstoffbildnerkonzentration**

Es existiert kein Messverfahren, über das die Bentonit- und Glanzkohlenstoffbildnerkonzentration im Formstoff direkt bestimmt werden kann, in einem Zeitrahmen, der eine Online-Regelung erlaubt. Laboruntersuchungen, die ca. 20 Minuten im Minimum benötigen, werden zur langfristigen Kontrolle der Formstoffzusammensetzung genutzt, können aber nicht zum Ausgleich kurzfristiger Schwankungen benutzt werden. Daher erfolgt die Bestimmung der Zugabemengen an Bentonit oder Glanzkohlenstoffbildnern nur anhand von Erfahrungswerten oder mit Hilfe der nachfolgend beschriebenen präventiven (vorbeugenden) Formstoffsteuerung.

### 3.2 Präventive Formstoffsteuerung

Der Verschleiß des Formstoffs beim Abguss hängt in starkem Maße von den gefertigten Produkten ab. Material, Gießgewicht, Kernanteile, aber auch die Gussstückgeometrie bestimmen die Temperaturverteilung in der Form und damit den Verbrauch der Inhaltsstoffe. Wenn diese Daten bekannt sind, können für ein zu produzierendes Gussprogramm der Verbrauch und damit die notwendigen Zugabemengen berechnet werden. Dazu wird eine Datenbank mit relevanten Gussstück- bzw. Modellplattendaten benutzt, anhand derer unter Berücksichtigung der aktuellen Formstoffzusammensetzung die Zugabemengen berechnet werden. Solch eine vorbeugende Formstoffsteuerung dient meist zur Steuerung der Bentonit- und Glanzkohlenstoffbildner, da deren Verbrauch weitgehend unabhängig von auftretenden Störungen oder Prozessabweichungen ist. Im Gegensatz dazu führen Stillstandszeiten zu einer verstärkten Austrocknung des Formstoffs, so dass zur Einstellung der Formstoff-Feuchte andere Regelungen greifen müssen.

Das Vorhandensein einer vorbeugenden Formstoffsteuerung ist Grundlage des hier entwickelten Regelungskonzeptes, so dass die Online-Beurteilung und Korrektur der Formstoffdaten nur zur Feinstuerung dienen muss.

Von den beteiligten Gießereien benutzt Georg Fischer seit mehreren Jahren solch eine vorbeugende Formstoffsteuerung, mit gutem Erfolg. Die zugrundeliegenden Zusammenhänge sind Stand der Technik und wurden in vorhergehenden Arbeiten des *Fachgebietes Formstoffe, Formverfahren und Produktverbesserung der Gerhard-Mercator-Universität-Gesamthochschule Duisburg* entwickelt und in mehreren Gießereien eingeführt /27/.

Es existieren verschiedene Abwandlungen dieses Verfahrens, die aber alle gemeinsam haben, das anhand des zu produzierenden Gussprogramms der Bentonitverbrauch und Kernsandzulauf prognostiziert und durch Bentonit- bzw. Glanzkohlenstoffbildnerzugaben ausgeglichen wird. Normalerweise erfolgt die Zugabe der verbrauchten Zusatzstoffe vor dem Mischer. Bei sehr stark schwankendem Gussprogramm ist es aber nicht möglich, den genauen Zugabezeitpunkt zum Ausgleich des Verbrauchs zu bestimmen, da dieser von der Verweilzeit im Altsandbunker und damit von seinem aktuellen Füllstand abhängt. Daher kann nach diesem Steuerungskonzept nur die mittlere Bentonit- oder Glanzkohlenstoffbildnerkonzentration ausgeregelt werden, ohne kurzfristige Schwankungen durch Produktwechsel ausgleichen zu können. Der Ausgleich dieser Schwankungen erfolgt dann durch den Einsatz entsprechender Bunkerstrategien bzw. die immer vorhandenen Mischvorgänge in den Bunkern, Kühlern oder Mischaggregaten.

Es ist allerdings auch möglich, die verbrauchten Zusatzstoffe an der Auspendestelle zuzugeben /10/. Durch eine Verfolgung der abgegossenen Formen ist dadurch zumindest bei kastengebundenen Formanlagen eine exakte Bestimmung des Zugabezeitpunkts möglich. Dadurch kann der Bentonit- und Glanzkohlenstoffbildnerverbrauch jeder einzelnen Form ausgeglichen werden, was zu einer weiteren Vergleichmäßigung der Formstoffparameter führt.

#### 3.2.1 Einflussgrößen

Eine vorbeugende Formstoffsteuerung hat dabei folgende Einflussgrößen zu berücksichtigen :

##### a) Bentonitbedarf

Während des Abgusses wird ein Teil des Bentonits totgebrannt, ein weiterer Teil thermisch geschädigt. Als Kennwert ist beim Abguss von 1 t Flüssigeisen je % des vorhandenen Bentonits mit einem Bentonitabbrand von 2,5 kg zu rechnen. Dabei verbleiben ca. 50 % des abgebrannten Bentonits als Schale auf den Quarzkörnern (Oolitisierung), 50 % verbleiben als Staub im System.

##### b) Glanzkohlenstoffbildner und weitere Zusatzstoffe

Der Bedarf an diesen Stoffen steht in einem festen Verhältnis zum Bentonitbedarf und kann daraus abgeleitet werden. Im Allgemeinen rechnet man mit 60 % der Bentonitzugabe oder weniger.

##### c) Schlammstoffniveau

Der Schlammstoffgehalt kann aus dem Bentonitabbrand und der Zugabe von Zuschlagstoffen vorhergesagt werden. Eine Einstellung eines bestimmten Schlammstoffgehalts sollte nicht z. B. durch

eine Entstaubung des Sandes erfolgen, da mit einer solchen Entstaubung auch aktiver Bentonit und Zusatzstoffe ausgetragen würden. Eine Regelung erfolgt daher sinnvollerweise über die Neusandzugabe.

#### d) Auffrischungsgrad

Unter Auffrischungsgrad versteht man die Quarzsandmenge, die je 100 kg vergossenen Eisens in das System eingebracht wird. Im Allgemeinen liegt er zwischen 10 und 20.

Der ständig zugeführte Neusand bzw. Kernsand führt zu einer Verdünnung der sonstigen Formstoff-Inhaltsstoffe. Dies ist im allgemeinen ein gewünschter Effekt, da sich durch ihn ein Gleichgewichtszustand einstellt, obwohl sich bei jedem Umlauf des Sandsystems durch die Transportvorgänge oder die Gießhitze die Anteile der einzelnen Formstoffkomponenten verschieben. Durch die mechanische Beanspruchung und den auftretenden Kornzerfall bzw. Abrieb verringert sich die mittlere Korngröße des Formstoffs, und der totgebrante Bentonit liegt weiter im Formstoff vor, was auch zu einer Erhöhung des Schlammstoffanteils führt. Die Zufuhr von Neu- oder Kernsand, d. H. von unbeanspruchten Quarzkörnern, und die gleichzeitig notwendige Zufuhr von Bentonit und Glanzkohlenstoffbildnern verhindern eine kontinuierliche Verfeinerung oder Verschlämzung des Formstoffs.

#### e) Steuerungsdiagramm

Bei Kenntnis der Anlagenparameter lässt sich ein Steuerungsdiagramm aufstellen, das eine Ermittlung des Bentonitbedarfs bei wechselnden Produktionsbedingungen erlaubt.

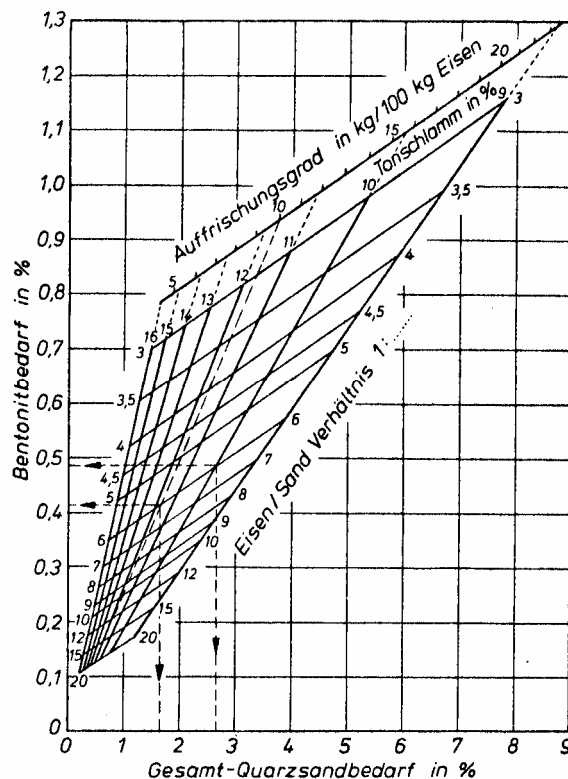


Abb. 29 : Steuerungsdiagramm für die Bentonitzugabe  
Druckfestigkeit 20 N/cm<sup>2</sup> bei 8,8 kg/dm<sup>3</sup> Schüttgewicht /13/

Anstelle eines solchen Diagramms kann natürlich auch ein entsprechendes Computerprogramm genutzt werden. Der heutige Stand der Technik erlaubt einen einfachen Zugriff auf Datenbanken, die meist zur Arbeitsvorbereitung schon vorhanden sind, z. B. zur Bestimmung der Produkt- oder Traubengewichte. Damit ist eine genauere Bestimmung, z. B. des Eisen/Sand-Verhältnisses möglich, und damit eine bessere Prognose der Verschleißfaktoren.

## f) Sandtemperatur

Beim Abguss und der nachfolgenden Abkühlung wird ein Großteil der Wärmeenergie, die sich im Flüssigmetall befindet, durch den Formstoff aufgenommen, ein weiterer Teil geht durch Strahlung oder Konvektion in die Umgebung. Um eine weitere Aufheizung des Formstoffs bei jedem Umlauf zu verhindern, ist vor der erneuten Verwendung eine Kühlung des Formstoffs notwendig. Dies kann durch eine ausreichende Verweilzeit in Sandbunkern erfolgen, meist werden allerdings spezielle Einrichtungen zur Formstoffkühlung eingesetzt. In diesen wird oft die Verdunstungskälte ausgenutzt, indem der Formstoff angefeuchtet und ein Teil des enthaltenen Wassers dann durch innigen Kontakt mit Luft verdunstet wird, wodurch die Abkühlung erfolgt. Die Verdunstung von 1 % Feuchtigkeit im Formstoff ergibt eine Kühlung um ca. 27°C-30°C, mit einem Luftbedarf von ca. 150 m<sup>3</sup> Luft/t Sand. Es bietet sich an, diese Kühlung gleichzeitig zur kontrollierten Vorbefeuchtung des Formstoffs einzusetzen.

### 3.2.2 Vor- und Nachteile der präventiven Formstoffsteuerung

Über eine Ermittlung der Parameter :

- Schüttgewicht oder Verdichtbarkeit
- Druckfestigkeit
- Feuchtigkeitsgehalt
- Schlammstoffgehalt
- Aufbereitungsgrad

kann eine Kontrolle der Steuerung erfolgen. Bei Abweichungen kann einmalig eine Korrektur erfolgen, oder es können langfristig die Steuerungsparameter optimiert werden. Da diese Sandkennwerte nur zur Kontrolle der Sandsteuerung benötigt werden, können die Untersuchungen in größeren Zeitabständen als bei einer direkten Regelung über diese Sandkennwerte erfolgen.

Da die vorbeugende Sandsteuerung nicht an die zeitintensive Ermittlung der Sandkennwerte gebunden ist, kann praktisch sofort auf Änderungen der Produktionsbedingungen reagiert werden. Dies bedeutet :

- Schnellere Korrektur von Störungen
- Geringe Schwankungen im Sandsystem
- Kosteneinsparungen durch Vermeidung von Überdosierungen
- Vereinfachung der Feuchteregeung

Der Verschleiß der Formstoffkomponenten wird anhand der vorliegenden Gussstück- bzw. Modellplattendaten berechnet und zur Korrektur der Formstoff-Inhaltsstoffe benutzt. Durch diese Steuerung nicht ausgeglichene Abweichungen können erst durch die manuelle Formstoffbeurteilung erkannt werden und führen dann zu manuellen Korrekturen der Steuerungsparameter oder der Formstoffkennwerte.

Zur Ermittlung der notwendigen Verschleißzahlen können mehrere Methoden eingesetzt werden, z. B. die Beurteilung von Erfahrungswerten oder die Auswertung von Probeabgüssen unter praxisnahen Gieß-, Abkühl- und Auspackbedingungen. Diese recht aufwendigen Analysemethoden können trotzdem nur zu angenäherten Ergebnissen führen.

Soweit vorhanden kann zur Ermittlung der Verschleißzahlen auch ein Programm zur Erstarrungssimulation eingesetzt werden. Diese Programme simulieren zur Ermittlung der Gussstückabkühlung gleichzeitig auch den Verlauf der Formstofftemperaturen. Diese Temperaturdaten können dann zur Bestimmung der Verschleißzahlen genutzt werden.

Da die Verschleißzahlen für jede Modellplatte bestimmt werden müssen, ist gerade im Bereich der Kundengießereien mit einem breiten Produktspektrum ein sehr hoher Aufwand zur Ermittlung der Kenndaten notwendig. Eine näherungsweise Schätzung der Parameter ist sicherlich auch möglich, verringert dann aber natürlich die Qualität der vorbeugenden Formstoffsteuerung

### 3.3 Online-Steuerung bzw. Regelung der Formstoffqualität

Allein durch den Einsatz einer vorbeugenden Formstoffsteuerung ist keine befriedigende Regelung der Formstoffqualität zu erreichen. Es wird immer eine permanente Kontrolle der Formstoffparameter benötigt, um Schwankungen auszugleichen bzw. langfristig die angestrebte Formstoffzusammensetzung einzuhalten.

Um diese unvermeidlichen Schwankungen auszugleichen, ist eine Beurteilung jeder einzelnen Charge wünschenswert, um z. B. bei der Formstoffaufbereitung im Mischer die entsprechenden aktuellen Zugabemengen an Wasser, Bentonit und Glanzkohlenstoffbildnern zu ermitteln. Zur Ermittlung des Aktivbentonit- bzw. Glanzkohlenstoffgehalts im Formstoff ist allerdings kein direktes Messverfahren bekannt, das ein Messergebnis so schnell liefern kann, dass eine Korrektur vor oder während der Aufbereitung der Charge erlauben würde.

Es bietet sich daher an, nicht die Formstoff-Feuchte zur Regelung der Formstoffqualität heranzuziehen, sondern Formstoffparameter, die die Verwendbarkeit des Formstoffs zur Herstellung einer Form direkt beschreiben. Um eine Regelung online, d. h. während des laufenden Betriebs durchführen zu können, ist eine Erfassung und Beurteilung jeder einzelnen Charge notwendig. Dies erfordert den Einsatz eines automatisch arbeitenden Messgerätes mit ausreichend kurzer Reaktionszeit.

#### 3.3.1 Grundlage des Steuerungskonzeptes

Grundlage des hier vorgestellten Regelungskonzeptes ist daher die Messung der Formstoff-Verdichtbarkeit. Obwohl eine Messung der Formstoff-Festigkeit, z. B. als Druck-, Spalt- oder Scherfestigkeit, weitere Aussagen über den Formstoff liefern könnten, ist die Messung dieser Größen nicht einfach, insbesondere im Altsand durch die hier vorliegenden sehr geringen Festigkeiten.

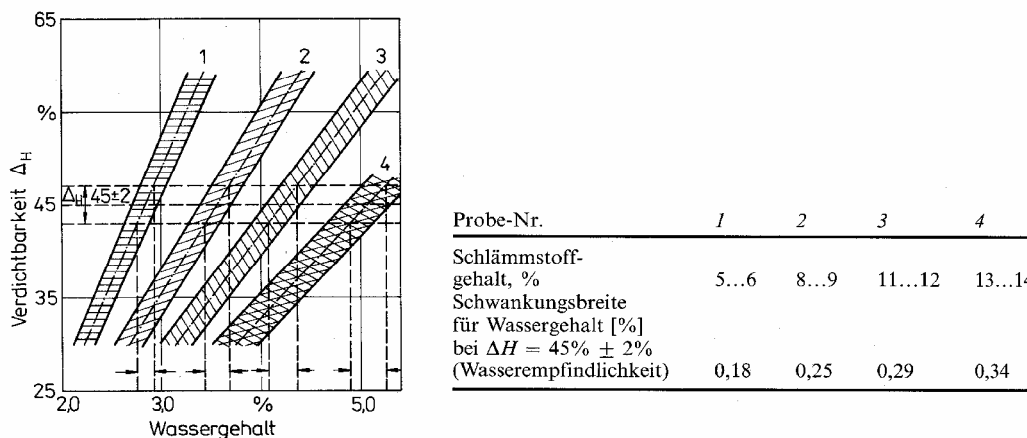


Abb. 30 : Einfluss der Formstoffzusammensetzung auf den formgerechten Wassergehalt /6/

Bei ansonsten konstanter Formstoffzusammensetzung besteht ein direkter Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt des Formstoffs und seiner Verdichtbarkeit. Damit kann die Messung der Verdichtbarkeit zur Steuerung der Formstoff-Befeuchtung genutzt werden.

Grundlage dafür ist die gießereispezifische Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Verdichtbarkeit und Feuchte. Dies ist abhängig von Anlagendaten, zum Beispiel dem Aufbereitungsgrad, von den eingesetzten Rohstoffen wie Bentonit, Glanzkohlenstoffbildnern oder Quarzsand, und von den betriebsspezifischen Formstoffkennwerten wie Aktivbentonitgehalt, Schlammstoffgehalt und Formstofftemperatur (Abb. 31).

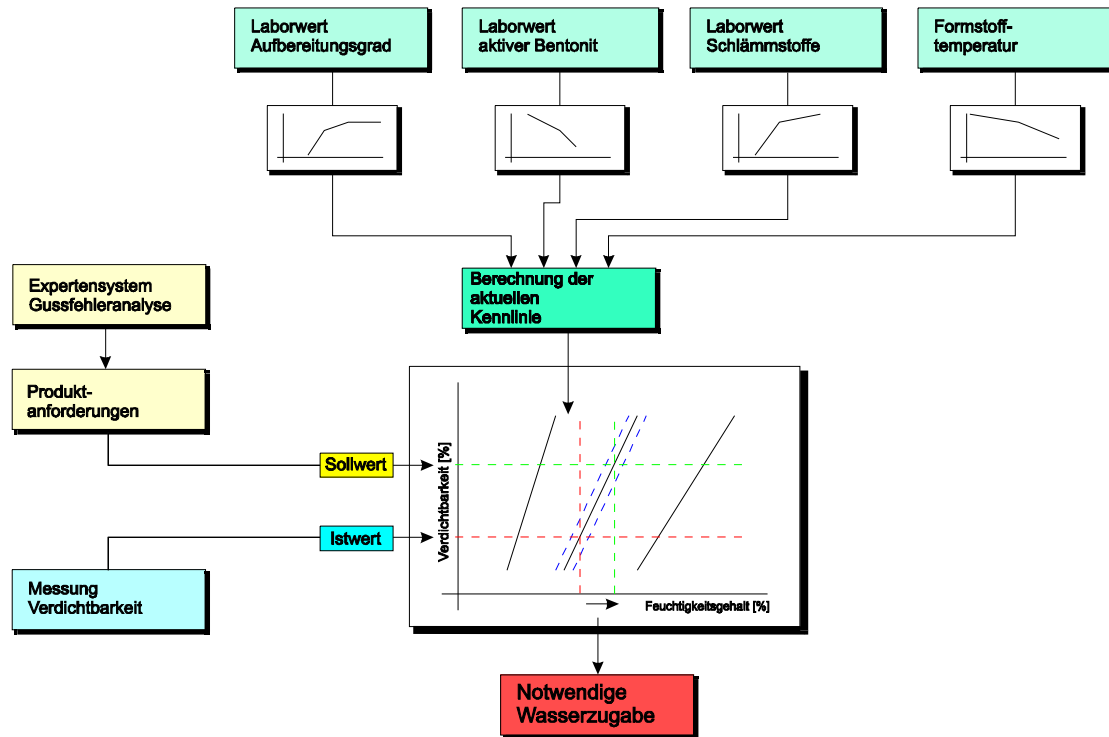


Abb. 31 : Regelschema Formstoff-Feuchte anhand der Verdichtbarkeit

Wenn sich der Formstoffzustand ändert, so verschiebt sich die Kennlinie Verdichtbarkeit - Feuchte und damit die zuzugebende Wassermenge. Als Ergebnis wird die gewünschte Verdichtbarkeit nicht erreicht, was bei konventionelle Steuerungen meist vom Bediener der Formanlage bemerkt wird und zu hektischen manuellen Änderung der Wasserzugabemengen führt.

Bei dem hier vorgestellten Steuerungskonzept fließt die Ist-Verdichtbarkeit in die Steuerung mit ein. Zur sicheren Prozessführung ist dabei eine automatische Erfassung der Verdichtbarkeit des Fertigsandes notwendig, was entweder durch entsprechende Meßsysteme an der Formanlage erfolgen kann oder durch den Einsatz eines weiteren Verdichtbarkeitsmessgerätes. Obwohl die Taktzeiten und Messzeiten den Einsatz eines einzelnen Messgerätes zur Erfassung der Altsand- und Fertigsandverdichtbarkeit möglich erscheinen lassen, macht die räumliche Trennung von Altsand- und Fertigsandbändern die betriebssichere Versorgung eines einzelnen Gerätes mit Formstoffproben schwierig.

In einem gewissen Bereich kann eine absinkende Bentonitkonzentration durch eine Erhöhung der Formstoff-Feuchte ausgeglichen werden, so dass bei einem erhöhten Wasserbedarf die Bentonitzugabe auch erhöht werden soll. Dies kann allerdings nur im Rahmen einer Feinkorrektur geschehen, da ein erhöhter Wasserbedarf auch auf andere Ursachen zurückzuführen sein kann.

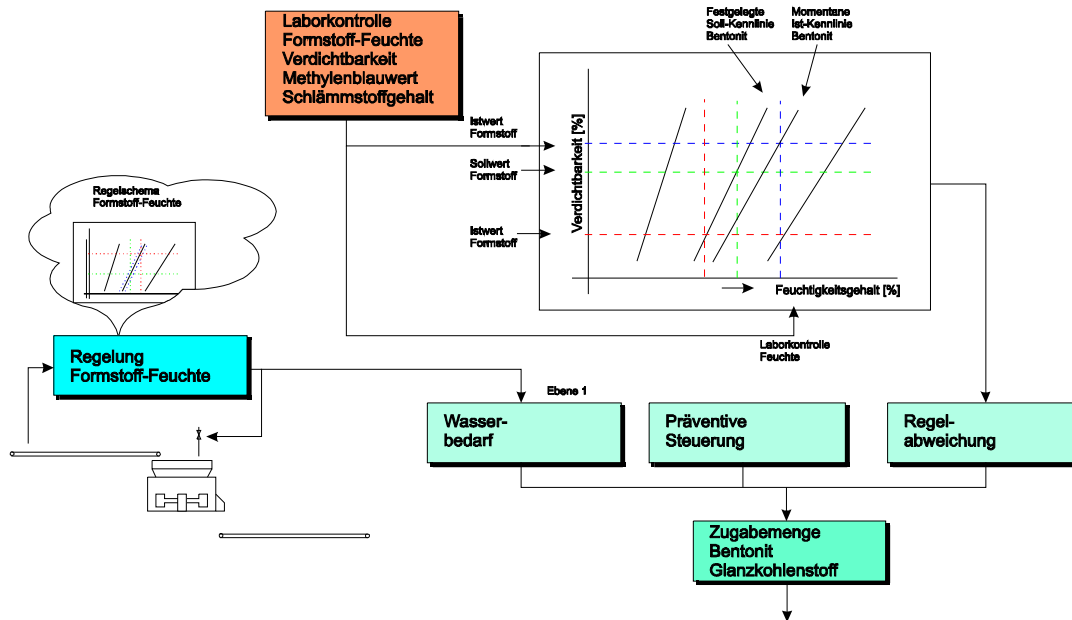


Abb. 32 : Regelschema Bentonitzugabe anhand der Verdichtbarkeit

Bei einer Veränderung des Aktivbentonitgehalts ändert sich auch die Kennlinie Feuchte/Verdichtbarkeit. (Abb. 32) Dies führt zu einer Regelabweichung des beschriebenen Feuchteregelkreises, und die Soll-Verdichtbarkeit wird nicht mehr erreicht. Ausgehend von dieser Kennlinienverschiebung kann auf die Veränderung der Bentonitkonzentration geschlossen werden, so dass auch eine Korrektur der Bentonitzugabe vorgenommen werden kann, ohne auf die zeitaufwendige Methylenblauwertbestimmung zurückgreifen zu müssen.

Diese Steuerung soll dabei nur zur Korrektur der Daten der präventiven Sandsteuerung dienen. Eine Kontrolle des Methylenblauwertes, Schlammstoffgehaltes usw. ist zur langfristigen Beurteilung von Abweichungstendenzen notwendig, wobei allerdings die Frequenz dieser Prüfungen wesentlich verringert werden kann.



### 3.3.2 Automatisches Messgerät zur Online-Beurteilung des Formstoffs

Um eine Online-Beurteilung der Formstoff-Verdichtbarkeit durchführen zu können, wurde ein automatisch arbeitendes Formstoffprüfgerät entwickelt, dessen Funktion sich an die anerkannten Laborprüfgeräte anlehnt (Abb. 33).

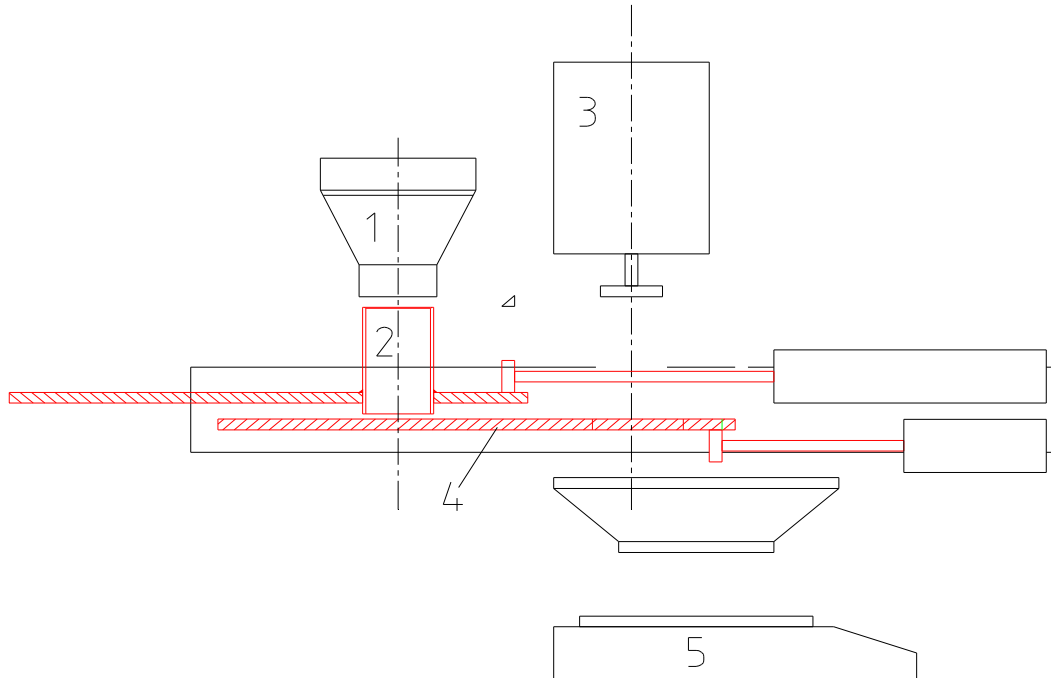


Abb. 33 : Prinzipdarstellung des neuentwickelten Verdichtbarkeitsmessgerätes

Der zu untersuchende Formstoff wird in den Fülltrichter 1 mit eingesetztem Sieb geleitet. Dies kann über einen Abstreifer von einem Förderband aus oder auch durch eine Öffnung im Mischer erfolgen. Unter dem Trichter befindet sich eine Prüfkörperhülse 2, die locker mit dem Formstoff gefüllt wird. Zur Bestimmung der Verdichtbarkeit wird die Hülse pneumatisch unter den Presszylinder 3 bewegt, wobei ein Abstreifer eine konstante Füllhöhe der Büchse sicherstellt, und dort durch einen Stempel verdichtet. Der Verdichtungsdruck wird über ein Regelventil eingestellt, und nach dem Stillstand des Stempels erfasst ein Wegaufnehmer im Presszylinder die Höhenabnahme des Prüfkörpers. Der Pressdruck kann dabei in Stufen angehoben werden, um mit einer einzigen Probe die Verdichtbarkeit des Formstoffs bei verschiedenen Pressdrücken zu messen.

Nach der Bestimmung der Verdichtbarkeit wird die Öffnung unter der Prüfkörperhülse freigegeben und der Formstoffzylinder ca. 20 mm nach unten aus der Hülse ausgeschoben. Die Verschlussplatte 4 wird wieder zurückbewegt, wodurch der Prüfkörper an der Unterkante der Prüfkörperhülse abgeschert wird. Dabei wird die notwendige Scherkraft gemessen. Zur Beendigung der Messung wird die Öffnung wieder freigegeben und der restliche Prüfkörper ausgestoßen. Eine elektronische Waage dient zur Messung des Prüfkörpergewichts.

Die Ablaufsteuerung dieses Gerätes erfolgt über einen angeschlossenen PC. Über eine Schnittstellenkarte mit analogen und digitalen Ein- und Ausgängen werden die Magnetventile angesteuert, Endschalter überwacht, die Druckkurven vorgegeben und der Verdichtungsdruck gemessen. Das Steuerprogramm wurde in Turbo Pascal erstellt. Es ist in der Lage, parallel zur Steuerung des Verdichtbarkeitsmessgerätes weitere Messaufgaben wahrzunehmen, z. B. die Messung von Formstofftemperaturen.

### 3.4 Fuzzy-Regelung zur Steuerung der Wasserzugabe

Schon im Jahr 1965 entwickelte der Wissenschaftler Lotfi A. Zadeh ein Verfahren, wie Rechnersysteme mit unscharfen und unpräzisen Informationen umgehen können. Er prägte den Begriff ‚fuzzy set‘ für die mathematische Beschreibung einer solchen unpräzisen Information, und entwickelte Methoden, sprachliche Beschreibungen solcher unpräzisen Informationen in Rechneralgorithmen zu überführen.

Ein Anwendungsfall dieser Fuzzy-Theorie ist der Einsatz eines Fuzzy-Reglers. Er entspricht im Aufbau einem konventionellen Regler, indem aus einer oder mehreren Eingangsgrößen eine Ausgangsgröße (oder Stellgröße) berechnet wird.

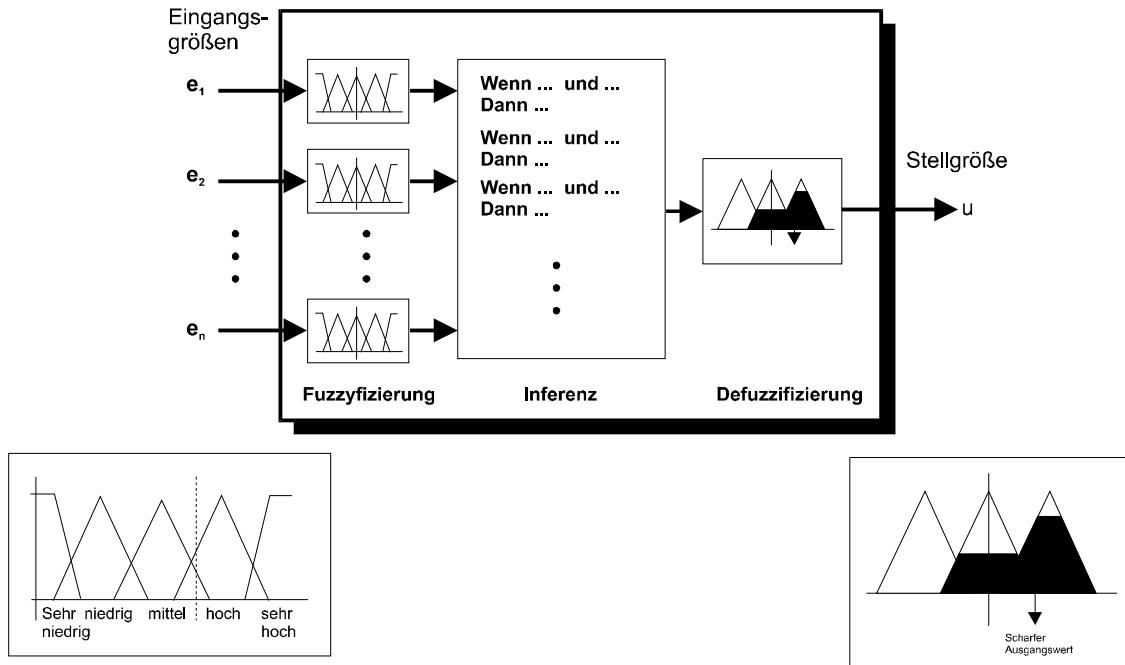


Abb. 34 : Schema eines Fuzzy-Reglers

Dabei werden die Eingangsgrößen, die zum Beispiel den aktuellen Zustand des Formstoffs beschreiben, fuzzifiziert, das heißt aus den scharfen Messwerten, wie sie von der Sensorik geliefert werden, werden begriffliche Beschreibungen gebildet, die mit unterschiedlichem Erfülltheitsgraden behaftet sind. So kann zum Beispiel eine gemessene Formstofftemperatur von 35° Celsius als gleichzeitig ‚mittel‘ und ‚hoch‘ angesehen werden. Andere Daten können manuell direkt als Beurteilung eingegeben werden, z. B. ‚zu trocken‘ oder ‚klebrig‘.

Anhand von vorher festgelegten Regeln wie zum Beispiel

*Wenn „Temperatur = Hoch“ und „Feuchte = Niedrig“ dann „Wasserzugabe = Hoch“*

wird nun das Verhalten des Reglers auf markante Kombinationen von Eingangsgrößen festgelegt. Dabei müssen bei weitem nicht alle möglichen Eingangskombinationen abgedeckt werden, um eine befriedigende Regelung zu erreichen. Als Ergebnis der Bewertung dieser Regeln, der sogenannten ‚Inferenz‘ oder dem ‚Ziehen von Schlussfolgerungen‘ erhält man meist mehrere, zum Teil widersprüchliche Ergebnisse. So kann eine erfüllte Regel ‚Wasserzugabe = Hoch‘ besagen, und gleichzeitig eine andere Regel ‚Wasserzugabe = Mittel‘. Bei der Defuzzifizierung wird nun aus allen diesen Ergebnissen wieder ein definierter Zahlenwert gebildet, z. B. 3,5 Liter Wasserzugabe pro Charge. Eine Beschreibung der benutzten Regeln zur Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung erfolgt im Kapitel 4.4

### 3.5 Expertensystem zur Beurteilung auftretender Gussfehler

Um eine permanente Aktualisierung der Sollwerte und Regelungsparameter zu erhalten, soll eine statistische Auswertung der Gussfehler erfolgen. Dabei werden alle Gussfehler erfasst und gespeichert, woraufhin ein Expertensystem die Gussfehler analysiert, Abhilfemaßnahmen ermittelt und zur Korrektur der Regelkreise benutzt.

Zur Klassifizierung der Gussfehler wird dabei eine beschreibende Darstellung benutzt, wie sie von *Gerhard Steinbauer* und *Kurth Orth* /28/ vorgeschlagen wurde.

Dabei werden die Gussfehler durch Festlegung von

- Fehlergruppe,
- Form des Fehlers,
- Aussehen des Fehlers,
- Fehlerort,
- Farbe des Fehlers

spezifiziert (Abb. 35). Durch diese Vorgehensweise kann man eine vorschnelle Zuordnung des Gussfehlers zu bestimmten Fehlerursachen vermeiden. Viele traditionelle Gussfehlerbezeichnungen implizieren bereits die Fehlerursache, was durch diese beschreibende Klassifizierung vermieden werden soll. So können traditionell kleine Hohlräume im Gussstück, in der Nähe der Gussoberfläche, entweder als Mikrolunker oder als Pinholes klassifiziert werden, was dann als Fehlerursache entweder die Schmelze oder den Formstoff festlegt.

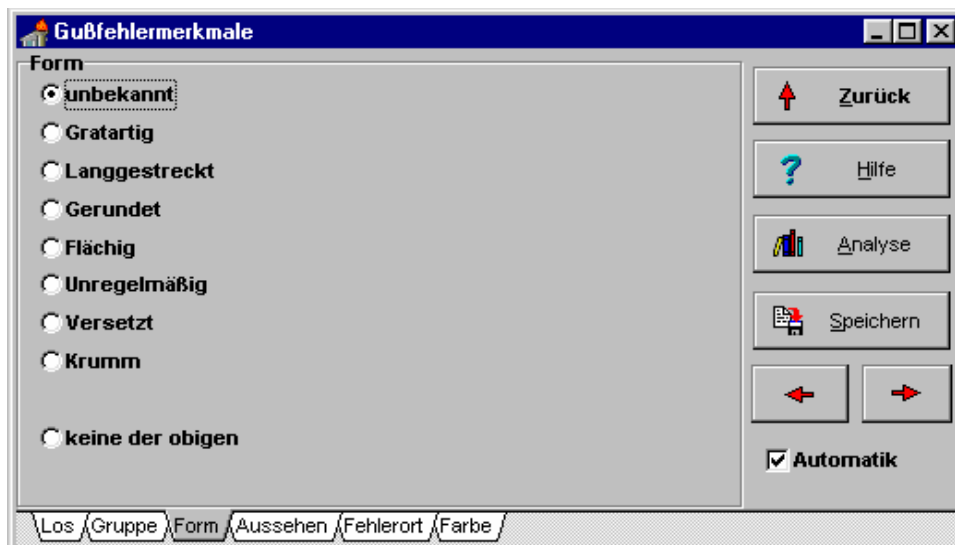


Abb. 35 : Eingabemaske des Expertensystems

Zur Beschreibung jedes Gussfehlers dienen folgende Angaben :

Fehlergruppe : Es kann eine grobe Einteilung des Fehlers vorgenommen werden, nach :

- Loch oder Vertiefung
- Unvollständiges Stück
- Werkstoff-Unterbrechung
- Anhaftungen
- Gestaltfehler.

Form des Fehlers : Die Form des Fehlers wird beschrieben, z.B. die Form eines Lunkers oder Grates :

- Gratartig
- Langgestreckt
- Gerundet
- Flächig
- Unregelmäßig
- Versetzt
- Krumm

Aussehen des Fehlers : Es erfolgt eine weitergehende Beschreibung des Fehlers, nach

- Glatt
- Normal
- Rauh
- Gestreift
- Faltig

Fehlerort : Beschrieben wird die Lage des Fehlers in Bezug zum Gussstück

- Kante oder Ecke
- Innenwinkel/Aussparung
- Fläche
- Querschnittsmitte
- Innenfläche

Farbe des Fehlers : Die Farbe des Gussfehlers kann eine weitere Klassifizierung der Gussfehler erlauben. Obwohl das Expertensystem in der vorliegenden Version nur zur Erkennung formstoffbedingter Gussfehler benutzt wird, erlaubt diese Klassifizierung nach einer Erweiterung der Wissensbasis auch die Auswertung materialbedingter Fehler.

- Blank
- wie Gussoberfläche
- Grau-Blau
- Schwarz-Glänzend
- Schwarz-Matt
- Weiß
- Farbig

Mit Hilfe einer Wissensbasis wird anhand dieser eingegebenen Klassifizierung die Art des Gussfehlers (also zum Beispiel 'Blasen, Poren') ermittelt (Abb. 36), und unter Rückgriff auf die Prozessdaten die wahrscheinliche Fehlerursache, und somit auch die Abhilfemaßnahmen (Abb. 37).

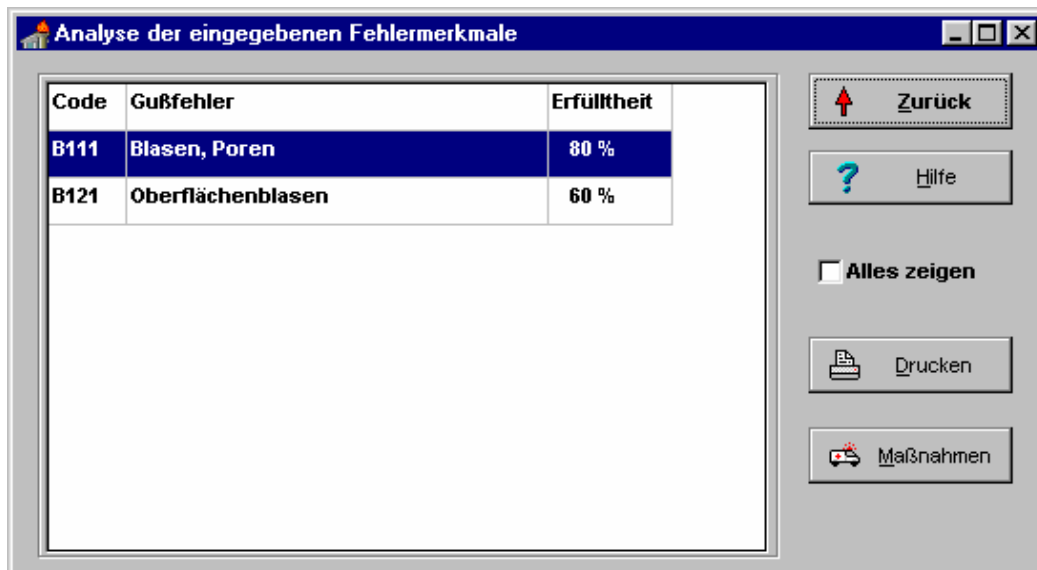


Abb. 36 : Analyse der eingegebenen Gussfehlermerkmale



Abb. 37 : Vorschläge für Abhilfemaßnahmen

Dabei werden Gemeinsamkeiten und Widersprüche innerhalb des Gussfehlerkollektivs erkannt (Abb. 38). Es könnten zum Beispiel die Mehrzahl der aufgetretenen Fehler auf eine zu hohe Gießtemperatur hinweisen, was als Abhilfemaßnahme zu einer Reduzierung der Gießtemperatur führen könnte. Eventuell deuten einige Fehler aber auch auf eine zu hohe, andere Fehler auf eine zu niedrige Gießtemperatur hin. Dies kann dann eventuell bedeuten, dass die Konstanz der Gießtemperatur, oder eventuell auch die Temperaturmessung, überprüft werden sollte.

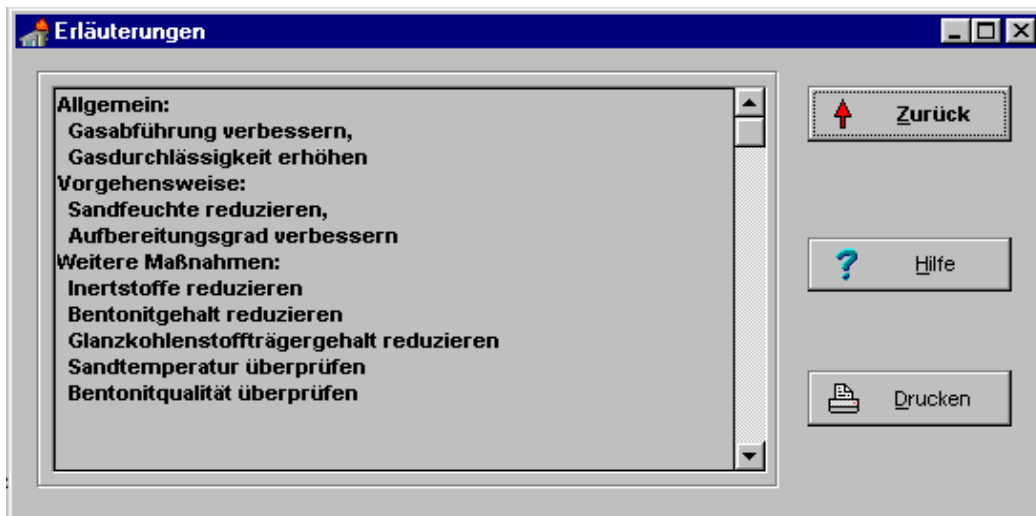


Abb. 38 : Weitere Erläuterungen zu den Fehlerursachen und Abhilfemaßnahmen

Die Fehlerursachen, soweit sie im Bereich der Formstoffaufbereitung liegen, dienen dann zur kontrollierten Anpassung der Regelung, eventuell auch zur Aktualisierung der Daten der vorbeugenden Sandsteuerung (Abb. 39). Die Empfehlungen des Programms können direkt den Bildschirmmasken entnommen werden, alternativ ist auch der Ausdruck entsprechender Auswertungen möglich (Abb. 40).

**Auswertung**

Modellnr:  Fehler gesamt : 2

Datum von:  .. ausgewertet: 2

Datum bis:  .. Ursachen gesamt : 87

Primärmaßnahme: ausgewertet: 5

Gasdurchlässigkeit nach oben korrigieren

Sekundärmaßnahme :

Sandtemperatur nach unten korrigieren

Zurück

Hilfe

Auswertung

Abb. 39 : Ausgabe der Primär- und Sekundärmaßnahmen

```

Fehlerursachenanalyse
Produktionsdatum      : 2.5.98
Modellnummer          : 1234a
Losgröße              : 2000
Anzahl Gussfehler     : 23

Merkmale des Fehlers :
Fehlergruppe         : Loch oder Vertiefung
Fehlerform           : Gratartig
Aussehen             : Rauh
Fehlerort            : Fläche
Farbe                : Grau-Blau

Analyse der Fehlermerkmale :
Code   Gussfehler                Erfülltheit
A144   Blattrippen oder Hohlkehlen  80 %
B111   Blasen, Poren                80 %

Steuerungsmaßnahmen :
Prio 2 : Fehler : Blasen, Poren - Erfülltheit 80 %

Wasser                : eventuell verringern
Verdichtbarkeit       :
Gasdurchlässigkeit    : eventuell erhöhen
Sandkörnung           :
Feinkorn              :
Schlammstoff         :
Bentonit              : eventuell verringern
Inertstaub            : eventuell verringern
C-Gesamt              : eventuell verringern
Koksanteil            : eventuell verringern
C-Aktiv               : eventuell verringern
Oolithisierungsgrad  :
Sandtemperatur        :

Nähere Erläuterungen :

Allgemein :
  Gasabführung verbessern
  Gasdurchlässigkeit erhöhen
  Feuchtegehalt überprüfen
    
```

Abb. 40 : Beispieldruck einer Auswertung

### 3.6 Simulation des Formstoffkreislaufs

Meist ist der gesamte Formstoffkreislauf einer Gießerei wenig transparent. Es fehlen Sensoren, um zum Beispiel den Temperaturverlauf oder die Sandfeuchte für einen kompletten Sandumlauf verfolgen zu können. Meist muss man sich daher mit Stichproben behelfen, die dann natürlich nur eine Momentaufnahme geben können.

Einen Ausweg kann dabei die Simulation des Formstoffkreislaufs bieten. Wenn es gelingt, diese Simulation an die physikalischen Gegebenheiten und die in der realen Sandaufbereitung gemessenen Werte anzupassen, kann zu jedem Zeitpunkt der komplette Zustand der Sandaufbereitung dargestellt und untersucht werden (Abb. 41).

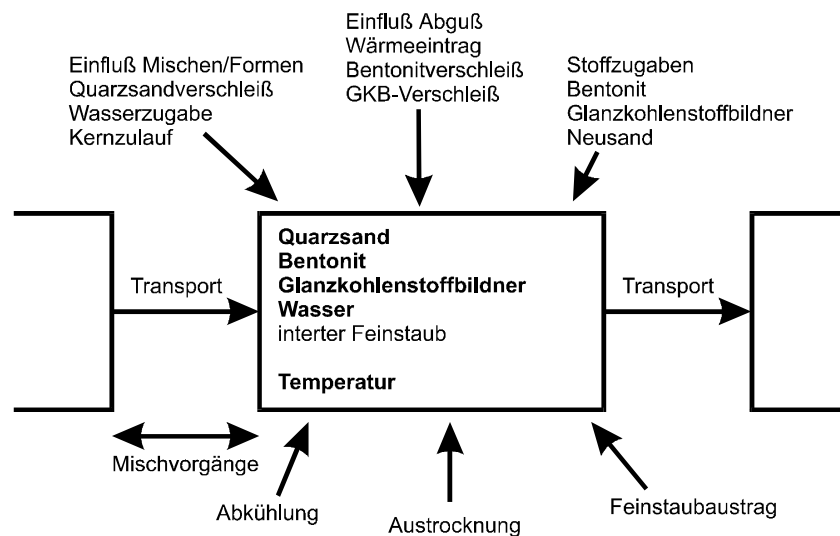


Abb. 41: Einflüsse auf ein Formstoffelement bei der Simulation

Eine Darstellung der gesamten Sandaufbereitungsanlage als Volumenmodell, ungefähr entsprechend einer Erstarrungssimulation, ist wegen der notwendigen Datenmengen praktisch unmöglich. Daher wurde zur Simulation ein anderer Ansatz gewählt, und zwar wurde der gesamte Formstoffkreislauf aus diskreten Formsandmengen zusammengesetzt, die einem Formkasteninhalt entsprechen. Natürlich treten an Bandübergabestellen und in Bunkern Vermischungen dieser Formsandmengen auf, dies kann aber relativ einfach über eine Mischungsrechnung berücksichtigt werden. Für jede dieser Formsandeinheiten speichert das Simulationsprogramm

- Temperatur,
- Feuchte,
- Aktivbentonit,
- Schlammstoffgehalt

jeweils nur als Mittelwert über die gesamte Einheit. Es wird nun der Durchlauf dieser Einheiten durch die Anlage simuliert, wobei bei jedem Schritt die Änderung der Daten berechnet wird.

Auch Bunker und Förderbänder werden auf diese Art dargestellt, wobei die leerlaufende Bänder oder leere Bunker als leere Formsandeinheiten behandelt werden (Abb. 42).

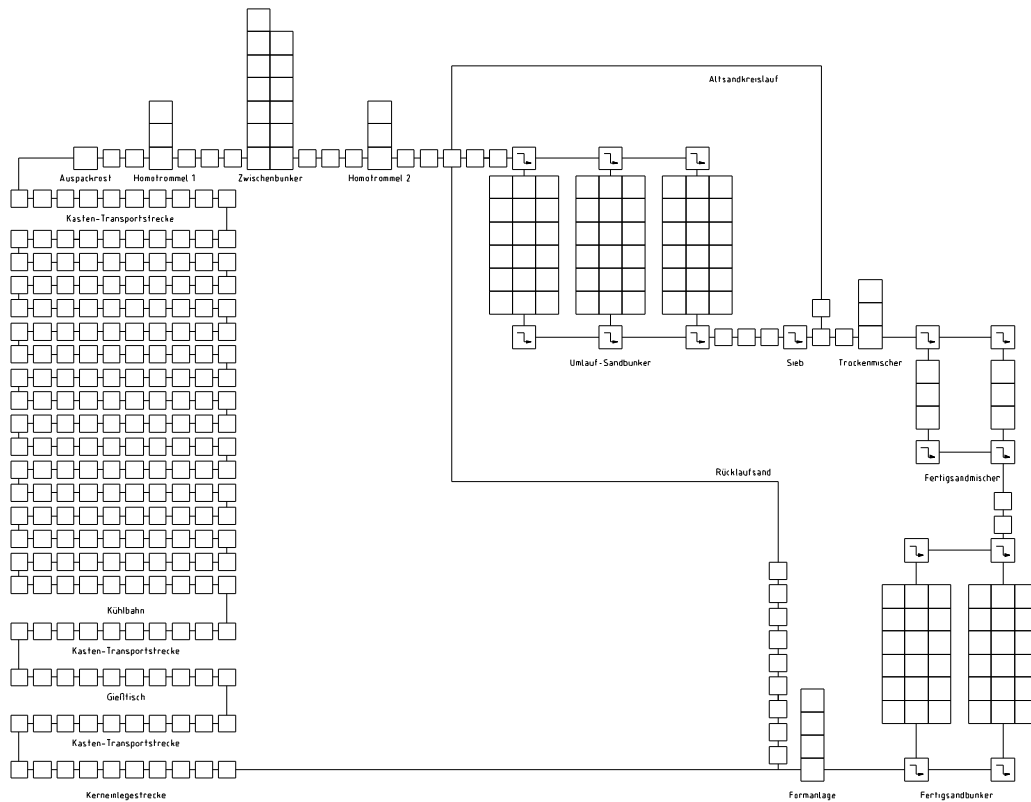


Abb. 42: Aufteilung des Formstoffkreislaufs in finite Elemente am Beispiel der Fa. Georg Fischer

Problematisch bei dieser Simulation ist immer, wenn eine Betrachtung dieser diskreten Einheiten nicht ausreicht, so zum Beispiel beim Auftreten von Überfallsand an der Formanlage, wo eigentlich ein bestimmter Prozentsatz des Formstoffs dem Hauptstrom entnommen wird. In der Simulation muss dieser Anteil entweder ignoriert werden, oder es muss dann in regelmäßigen Abständen eine komplette Einheit als Überfallsand entnommen werden.

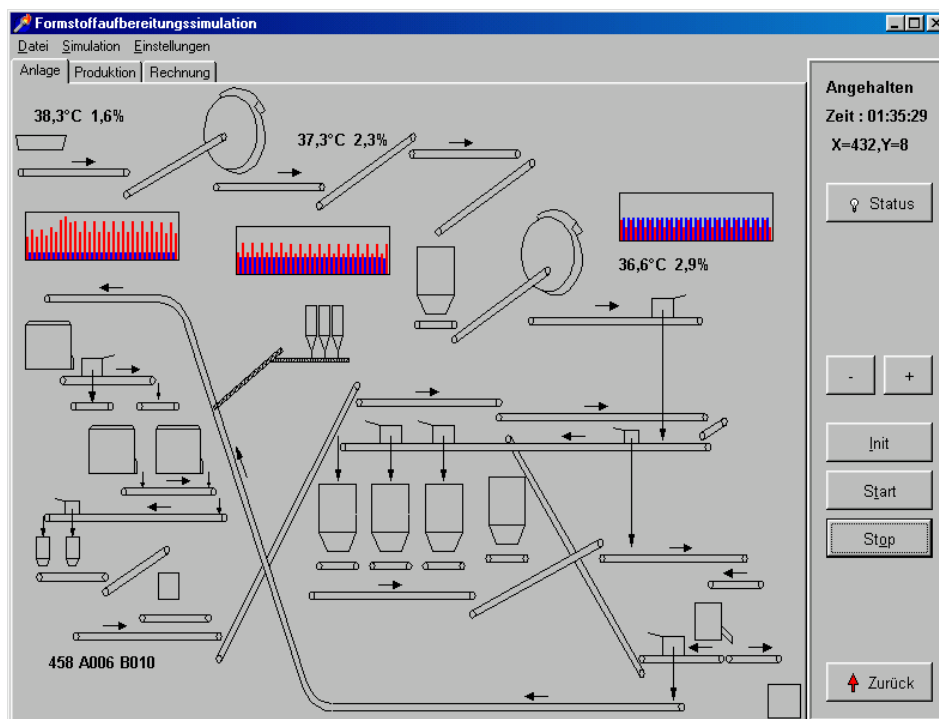


Abb. 43: Anlagenschaubild mit Momentaufnahme eines Simulationslaufs



Während der Simulation, die anhand von realen Modellplattendaten durchgeführt wird, stehen natürlich die Daten des simulierten Formstoffs an jeder Position und zu jedem Zeitpunkt zur Verfügung und können in ein Anlagenschaubild (Abb. 43) eingeblendet werden. Das Schaubild zeigt die Formstoffaufbereitung der Anlage AM409 bei Georg Fischer. Im Beispiel wird im Takt der Formanlage die Formstofftemperatur und -feuchte an drei verschiedenen Positionen in der Formstoffaufbereitung angezeigt, direkt an der Auspackstelle und hinter der ersten und zweiten Homogenisierungstrommel, jeweils als Momentanwert und als Balkendiagramm des zeitlichen Verlaufs. Diese Daten werden auch gespeichert, um nachträglich den zeitlichen Verlauf auswerten zu können. Ein Vergleich mit Realdaten unter den gleichen Produktionsbedingungen erlaubt eine kontinuierliche Verbesserung der Simulation.

	Station A	Station B	
Ref	A006	B010	
Ballen	175	174	
Platte/Modell 1	6705/6139	7554/6999	
Platte/Modell 2	7801/7124	-	
Platte/Modell 3	-	-	
Platte/Modell 4	-	-	
Platte/Modell 5	-	-	
Traubengewicht	80,9	47,7	kg
Formstoffmenge	540,4	546,4	kg
Formstoff/Guß-Verhältnis	6,676	11,455	

Abb. 44: Produktionsdaten als Basis der Simulation

Ein weiteres Fenster (Abb. 44) zeigt die Produktionsdaten, die als Basis zur Simulation dienen. Im gezeigten Beispiel wurden diese Daten den gespeicherten Prozessdaten der Anlagensteuerung bei GF entnommen, so dass die simulierten Takte der Formanlage auch real auftretende Schwankungen und Störungen widerspiegeln.

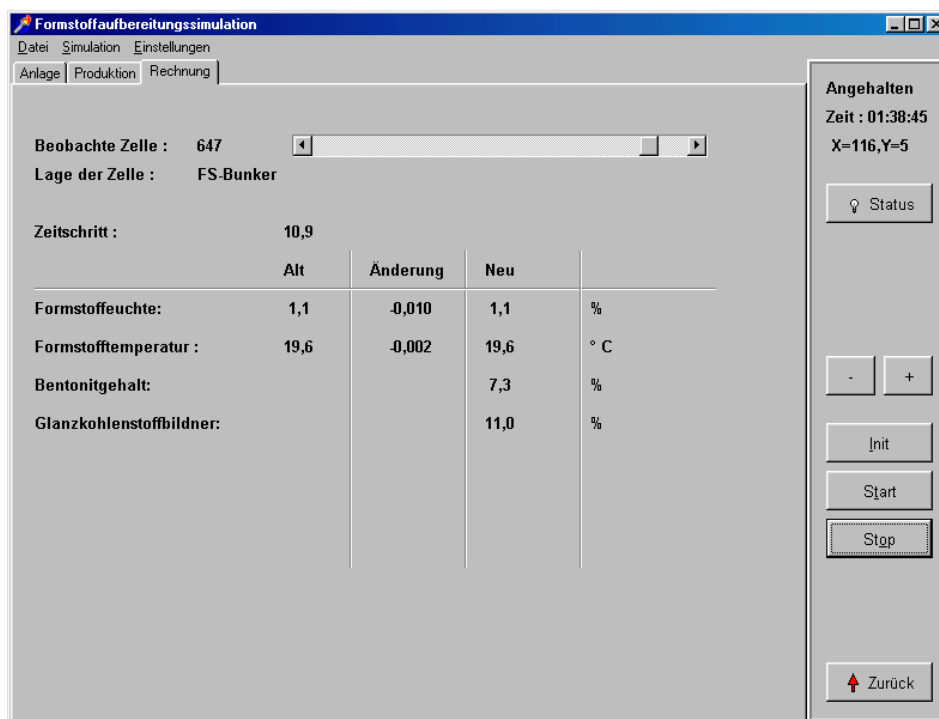


Abb. 45: Einzeldarstellung einer Zelle (Formstoffeinheit) während der Simulation.

Es besteht weiter die Möglichkeit, während des Simulationslaufs eine einzelne ortsfeste Formstoffeinheit herauszugreifen, z. B. als Position eines Bunkers oder Bandes. Ein weiteres Fenster (Abb. 45) stellt dann die Berechnung für diese Zelle dar, jeweils als Daten zum Start des betrachteten Zeitschritts, der Änderung der Prozessdaten und des Resultats am Ende des Zeitschritts.

## 4 Erprobung des Steuerungskonzeptes

### 4.1 Beschreibung der beteiligten Gießereien

An dem Gemeinschaftsprojekt, dessen Ziel die Entwicklung und Einführung dieses Steuerungskonzeptes war, waren drei verschiedene Gießereien beteiligt :

- AE Goetze; Burscheid,
- Georg Fischer; Mettmann und
- Woeste; Velbert.

Durch die Auswahl dieser Gießereien mit sehr unterschiedlichem Anlagenpark, Produktspektrum und Produktionsverfahren soll eine breite Basis zur Beurteilung und Einführung des Steuerungskonzeptes geschaffen werden. So soll verhindert werden, dass eine Problemlösung für eine einzelne Gießerei gefunden wird, ohne sie auf andere Anwendungsfälle verallgemeinern zu können.

In der Anlage 1 sind die wichtigsten Anlagen- und Produktdaten der beteiligten Gießereien tabellarisch dargestellt.

#### 4.1.1 Woeste, Velbert

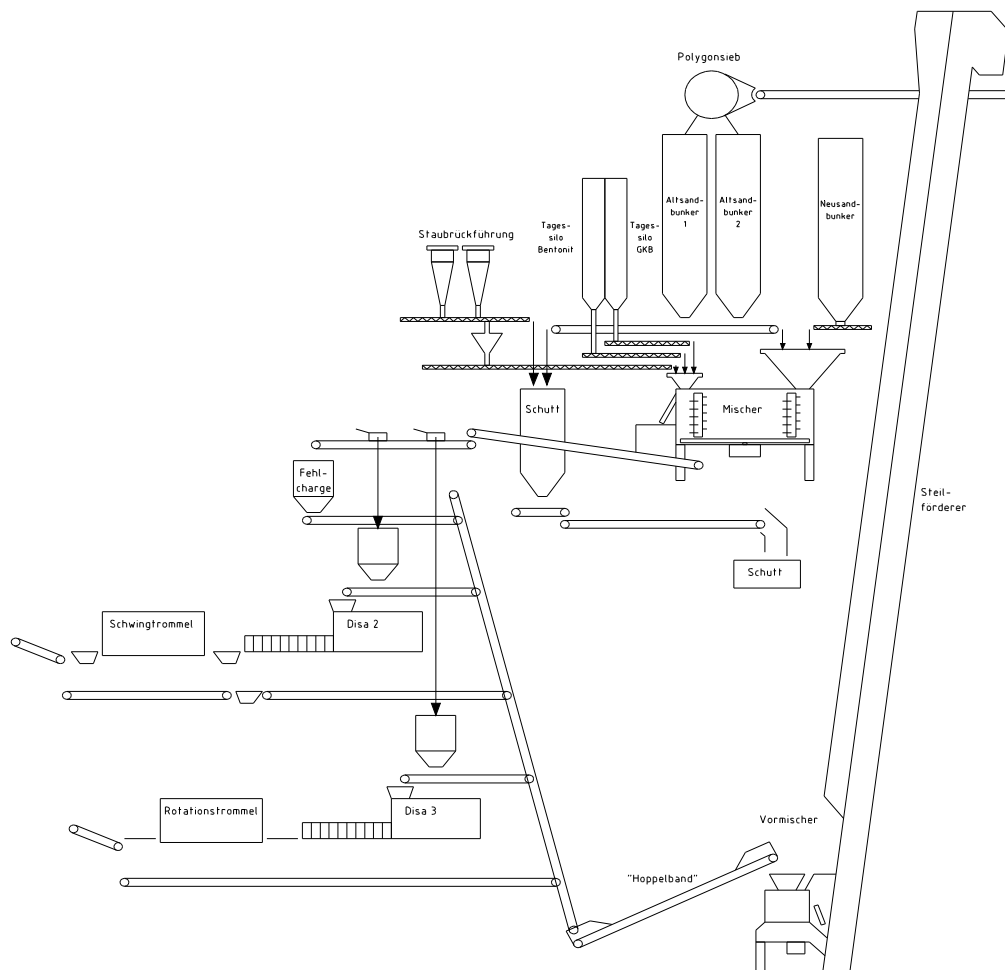


Abb. 46 : Formstoffkreislauf Woeste

Die Fa. *Woeste* benutzt eine Sandaufbereitung zur Versorgung von zwei Disamatik-Formanlagen, wobei auf Anforderung der Maschine eine Charge hergestellt und dem Maschinenbunker zugeführt wird (Abb. 46). Die beiden Formanlagen benutzen unterschiedliche Auspackeinrichtungen, eine Schwingrinne und

eine rotierende Auspacktrommel, die unterschiedliche Abkühlungen und Vorbefeuchtungen des Altsands zur Folge haben. Der Altsand der beiden Anlagen wird zusammengeführt, in einem Vormischer homogenisiert und dann über einen Schrägförderer heruntergekühlt und in die obere Etage der Sandaufbereitung transportiert. Dort werden über ein Polygonsieb Grobteile entfernt und der Formstoff in zwei Bunkern zwischengelagert. Bedingt durch die begrenzte Bunkerkapazität ist bei voller Anlagenauslastung die Verweilzeit in den Bunkern nur kurz, und durch den im Umlauf befindlichen Sand ein Bunker oft leer. Die vorhandene Formstoffkühlung ist nicht ausreichend, was gegen Schichtende teilweise zu Formstofftemperaturen von 80°C und mehr führt. Im Vorfeld der Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes wurde durch Optimierung der Vorbefeuchtung eine gewisse Verbesserung der Formstoffkühlung erreicht.

Die Steuerung der Formstoff-Feuchte erfolgt durch eine Einrichtung der Fa. *Lippke*. Die Feuchte des Formstoffs wird dielektrisch im Dosierbehälter des Mixers bestimmt und die Wasserzugabemenge ermittelt.

#### 4.1.2 Georg Fischer, Mettmann

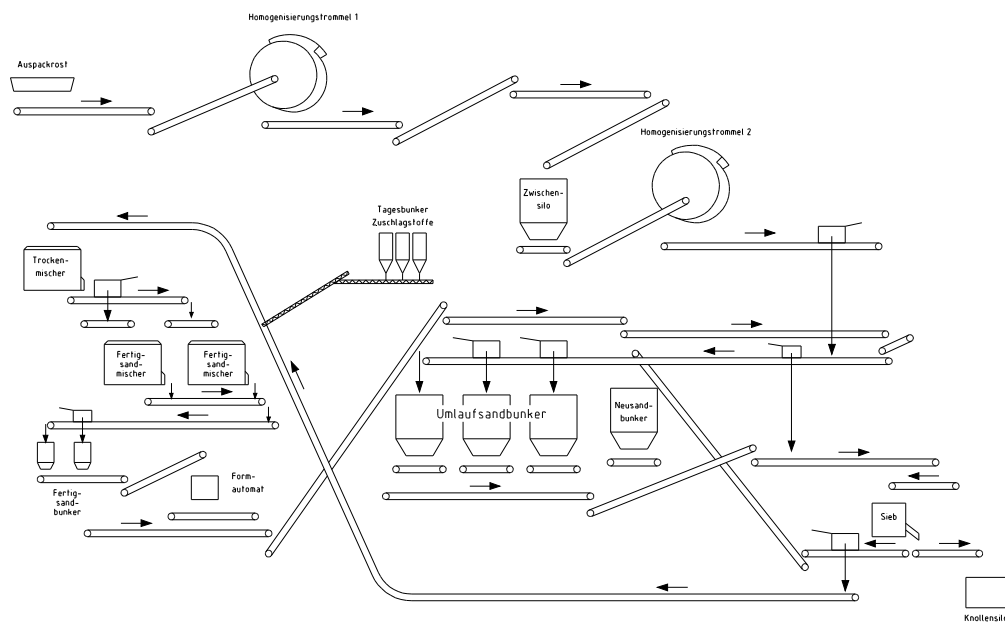


Abb. 47 : Formstoffaufbereitung Georg Fischer AM 409

Bei der Fa. *Georg Fischer, Mettmann*, wurde die Formstoffaufbereitung der Formanlage AM 409 im Rahmen dieses Projektes untersucht (Abb. 47). Bei dieser Anlage wird durch zwei Homogenisierungstrommeln der Formstoff vergleichmäßig, vorbefeuchtet und dadurch gekühlt. Im Vergleich zu den beiden anderen Gießereien ist daher der Formstoff in den Altsandbunkern und damit auch vor den Mixern vergleichsweise feucht, mit nur geringen Schwankungen. Die Wasserzugabe in den beiden kontinuierlich arbeitenden Mixern dient daher nur zur Feineinstellung. Sie wird nicht über eine Feuchtemessung gesteuert, sondern über Moldability-Controller, die kontinuierlich Sandproben aus den Mixern entnehmen und die Wasserzugabe anhand des Durchtrittsvermögens durch verschieden breite Spalten steuern.

Seit mehreren Jahren ist ein Programm zur vorbeugenden Formstoffsteuerung im Einsatz, das von *Georg Fischer* in Zusammenarbeit mit *IKO Erbslöh* und des *Fachgebiets Formstoffe, Formverfahren und Produktverbesserung* der *Gerhard-Mercator-Universität-Gesamthochschule Duisburg* erstellt wurde.

### 4.1.3 AE Goetze, Burscheid

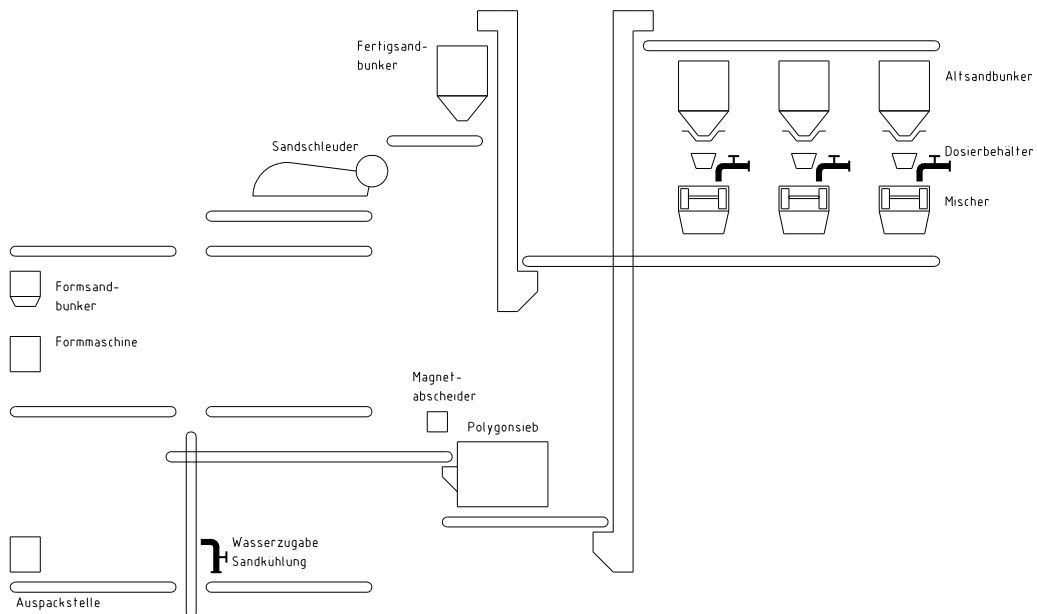


Abb. 48 : Sandaufbereitung AE Goetze

Im Gegensatz zu den beiden anderen Gießereien verwendet *AE Goetze* Natursand, ein Quarzsand/Ton-Gemisch, das in einer *Nievelsteiner* Grube abgebaut wird. Der verbrauchte Bindeton wird durch Zugabe von Bentonit ausgeglichen. *AE Goetze* stellt auf der betrachteten Anlage Kolbenringe her, wobei keine Glanzkohlenstoffbildner zum Einsatz kommen.

Der Formstoff wird in drei parallel arbeitenden Chargenmischern aufbereitet, wobei die Formstoff-Feuchte durch je eine Wasserdosierung der Fa. *Michenfelder* gesteuert wird. Über die eine Sandaufbereitung werden 9 Formstrecken versorgt (Abb. 48).

## 4.2 Vorversuche

Zur Durchführung dieser Untersuchungen standen zwei verschiedene Feuchtemessgeräte zur Verfügung, ein Hygrometer der Fa. SMG, Bad Bevensen (heute Datec, Braunschweig), das nach dem Prinzip der Leitfähigkeitsmessung arbeitet, und ein Gerät FL-H2O der Fa. Franz Ludwig, das nach dem Prinzip der Mikrowellenadsorption arbeitet.

### 4.2.1 Einfluss der Verdichtung des Formstoffs

Es wurde zwei Prüfmischungen hergestellt, jeweils bestehend aus :

- Quarzsand H32            7000 g
- Bentonit Geko            560 g (8%)
- Wasser                    210 g (3%)

und im Labormischer (Kollergang, Fa. GF) aufbereitet (1 Minute Homogenisierungszeit, 7 min Mischzeit nach Zugabe des Wassers). Er ergaben sich die Formstoff-Feuchten :

- Charge 1 : 2,9%
- Charge 2 : 2,8 %

Die beiden Chargen wurden dann zusammengeführt, homogenisiert und gemeinsam beurteilt.

Dazu wurde eine Teilmenge des Formstoffs in je ein zylindrisches Gefäß gesiebt und die Oberfläche abgestrichen, jeweils mit 150mm und 250 mm Schütthöhe. Die Messelektrode des Feuchtemessgerätes Fa. Ludwig wurde auf die Oberfläche des Formstoffs aufgesetzt und der Anzeigewert des Messgerätes notiert (jeweils 3 Messungen). Daraufhin wurde eine Kunststoffplatte auf die Oberfläche gelegt und der Formstoff durch Vibration und Belastung der Platte in Stufen verdichtet.

Zur Beurteilung des Feuchtemessgerätes der Fa. SMG wurde ein anderes Gefäß benutzt, auf dessen Boden die Plattenelektroden zur Leitfähigkeitsmessung fest montiert waren. Auch dieses Gefäß wurde durch Einsieben des Formstoffs locker gefüllt und der Formstoff dann in Stufen verdichtet.

Schütthöhe	Verdichtung	Verdichtung	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
mm	mm	%	%	%	%	%
150	5	3,3	3,07	3,04	3,49	3,20
150	10	6,7	3,57	3,15	3,52	3,41
150	15	10,0	3,75	3,35	3,50	3,53
150	20	13,3	3,89	3,55	3,62	3,69
150	25	16,7	3,93	3,98	3,61	3,84
150	30	20,0	4,19	4,23	3,55	3,99
150	35	23,3	3,88	3,82	4,60	4,10
150	40	26,7	4,10	4,66	4,35	4,37
150	45	30,0	4,57	4,87	4,41	4,62
150	50	33,3	4,67	5,28	4,72	4,89
150	55	36,7	5,34	5,36	4,88	5,19
150	60	40,0	6,22	6,27	5,36	5,95
250	5	2,0	3,06	3,07	3,00	3,04
250	10	4,0	3,36	2,98	3,29	3,21
250	15	6,0	3,25	3,32	3,61	3,39
250	20	8,0	3,36	3,47	3,90	3,58
250	25	10,0	3,54	3,38	3,98	3,63
250	30	12,0	4,11	3,59	3,76	3,82
250	35	14,0	4,18	3,75	3,84	3,92
250	40	16,0	3,77	4,27	3,91	3,98
250	45	18,0	4,23	3,98	3,94	4,05
250	50	20,0	4,21	4,23	3,90	4,12
250	55	22,0	4,25	4,31	4,04	4,20
250	60	24,0	4,16	4,18	4,43	4,26

Tab. 2 : Ergebnisse Feuchtemessgerät Fa. Ludwig (Mikrowellenmessverfahren)

Schütthöhe	Verdichtung	Verdichtung	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
mm	mm	%	%	%	%	%
150	0	0,0	2,77	3,40	3,32	3,16
150	10	6,7	3,11	3,08	4,41	3,53
150	20	13,3	3,54	4,33	3,55	3,81
150	25	16,7	3,76	3,77	4,61	4,05
150	30	20,0	4,92	3,75	3,93	4,20
150	35	23,3	4,48	4,40	4,50	4,46
150	45	30,0	3,76	5,30	5,32	4,79

Tab. 3 : Ergebnisse Feuchtemessgerät Fa. SMG (Leitfähigkeitsmessverfahren)

Zusammenfassung der Ergebnisse :

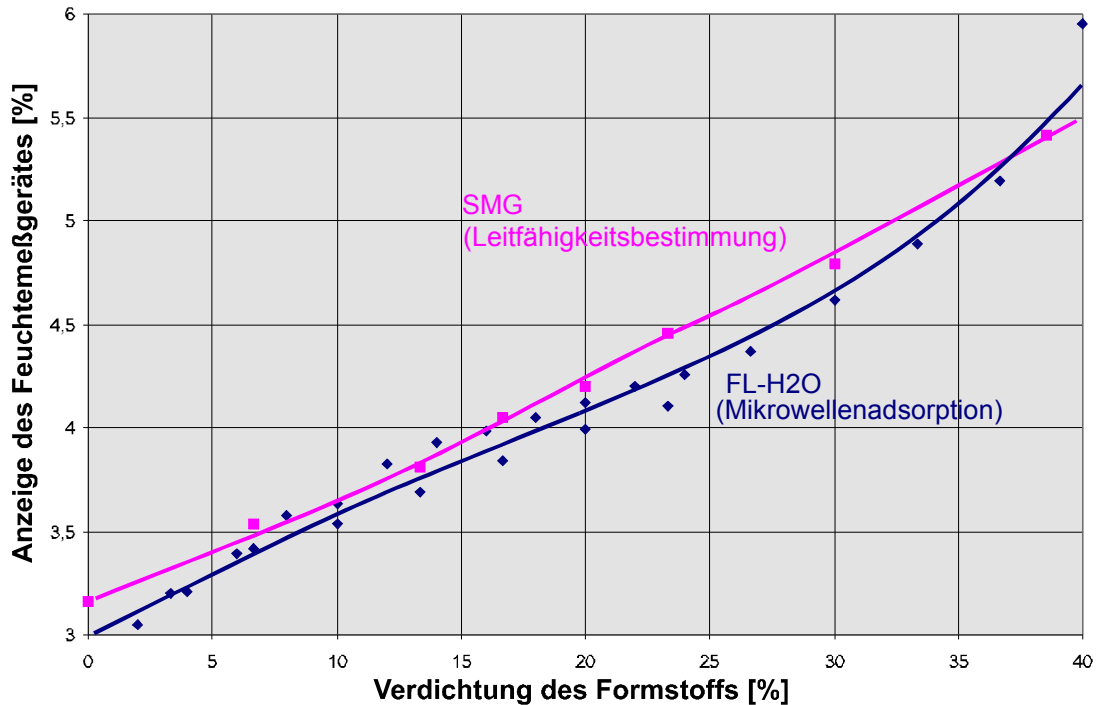


Abb. 49 : Anzeige der Feuchtemessgeräte für verschiedene Formstoff-Verdichtungen

Beide untersuchte Messverfahren weisen eine praktisch identische Abhängigkeit der angezeigten Feuchte von der Verdichtung des Formstoffs im Messvolumen auf. Dies ist dadurch zu erklären, dass beide Messverfahren im wesentlichen die Menge des vorhandenen Wassers in einem bestimmten Messvolumen (zwischen den Elektroden bzw. in einer bestimmten Schichtdicke vor dem Messkopf) bestimmen. Bei unterschiedlichen Verdichtungen des Formstoffs ist aber, bei konstanter Formstoff-Feuchte, die Packungsdichte in diesem Messvolumen unterschiedlich, wodurch auch die zur elektrischen Leitung oder zur Mikrowellenadsorption zur Verfügung stehende Wassermenge schwankt.

Diese Untersuchung unterstreicht, wie wichtig die richtige Wahl des Einbauortes der Feuchtemesseinrichtung ist. Eine genaue Bestimmung der Formstoff-Feuchte ist nur möglich, wenn die Schüttdichte bzw. Verdichtung an der Messstelle weitgehend konstant bleibt.



#### 4.2.2 Einfluss der Bentonit-Sorte

Zur Untersuchung standen 3 verschiedene Bentonitsorten der Fa. *IKO Erbslöh* zur Verfügung :

- D Griechischer Bentonit, natürliche Aktivierung
- E Süddeutscher Bentonit, zwangsaktiviert
- SR Sardischer Bentonit

Jede dieser Sorten wurde bei zwei verschiedenen Formstoff-Feuchten beurteilt.

Dazu wurden Prüfmischung hergestellt, bestehend aus :

- Quarzsand H32 7000 g
- Bentonit, 3 verschiedene 560 g (8%)
- Wasser 105 g (1,5%) bzw. 175g (2,5%)

und im Labormischer (Kollergang, Fa. GF) aufbereitet (1 Minute Homogenisierungszeit, 7 min Mischzeit nach Zugabe des Wassers). Die reale Formstofffeuchte wurde durch Wägung kontrolliert.

Die Messung wurden zum einen bei unverdichtetem Formstoff durchgeführt (Siebung durch ein Sieb mit 3 mm Maschenweite) und anschließend bei einem um 10 % verdichteten Formstoff wiederholt. Nach Abschluss der Messung wurde das Gefäß entleert und die Schüttdichte des Formstoffs bestimmt.

Bentonit	Gem.	Schütt- dichte [g/l]	Anzeige SMG		Anzeige FL		Fehler SMG		Fehler FL	
	Feuchte		Unverd.	Verd.	Unverd.	Verd.	Unverd.	Verd.	Unverd.	Verd.
	[%]						%	%	%	%
D	1,2	1194	1,27	1,46	1,88	2,08	6	22	57	73
E	1,2	1052	1,60	1,77	1,39	1,88	33	47	16	57
SR	1,3	1080	1,80	1,93	2,35	2,27	38	49	81	74
D	2,5	824	1,91	2,05	1,50	1,88	-24	-18	-40	-25
E	2,4	701	1,91	1,97	0,92	2,09	-20	-18	-62	-13
SR	2,2	666	1,92	2,01	1,59	1,76	-13	-9	-28	-20
Mittlere Abweichung vom Realwert in %							22	27	47	44

Tab. 4 : Feuchtemessungen bei unterschiedlichen Bentonit-Sorten

Um den Einfluss der unterschiedlichen Schüttdichten der verschiedenen Formstoffe auszugleichen, wurde eine rechnerische Korrektur anhand der gemessenen Schüttdichten durchgeführt :

Bentonit	Gem.	Schütt- dichte [g/l]	Anzeige SMG		Anzeige FL		Fehler SMG		Fehler FL	
	Feuchte		Unverd.	Verd.	Unverd.	Verd.	Unverd.	Verd.	Unverd.	Verd.
	[%]						%	%	%	%
D	1,2	1194	0,91	1,05	1,41	1,56	-24	-13	18	30
E	1,2	1052	1,31	1,44	1,19	1,60	9	20	-1	33
SR	1,3	1080	1,43	1,53	1,95	1,88	10	18	50	44
D	2,5	824	1,99	2,13	1,63	2,04	-20	-15	-35	-18
E	2,4	701	2,34	2,41	1,18	2,67	-3	0	-51	11
SR	2,2	666	2,47	2,59	2,13	2,37	12	18	-3	8
Mittlere Abweichung vom Realwert in %							13	14	26	24

Tab. 5 : Feuchtemessungen bei unterschiedlichen Bentonit-Sorten,  
rechnerische Korrektur anhand der Schüttdichte

Im Mittel beträgt die Abweichung der Anzeigewerte von der realen Feuchte ohne Korrektur der Schüttdichte 35 %, nach Korrektur 19 %. Die folgenden Darstellungen (Abb. 50 -

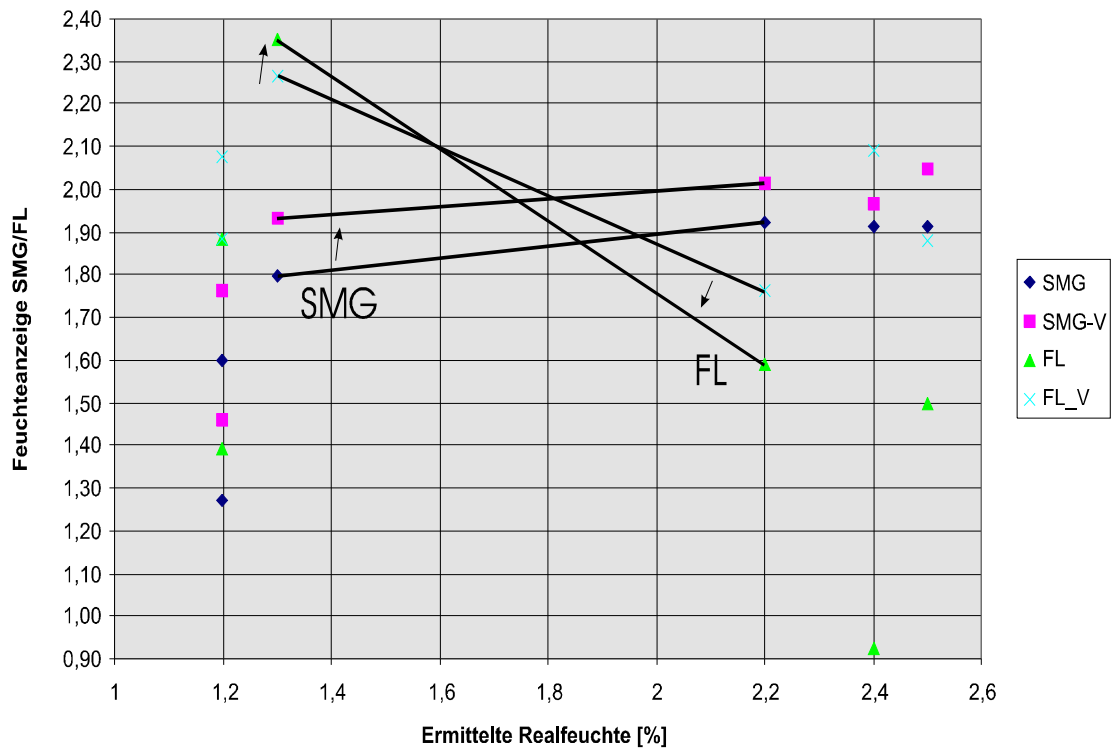


Abb. 52) zeigen den Einfluß der Verdichtung auf die ermittelten Messwerte, für jede der untersuchten Bentonitarten. Weitere Auswertungen befinden sich im Anhang.

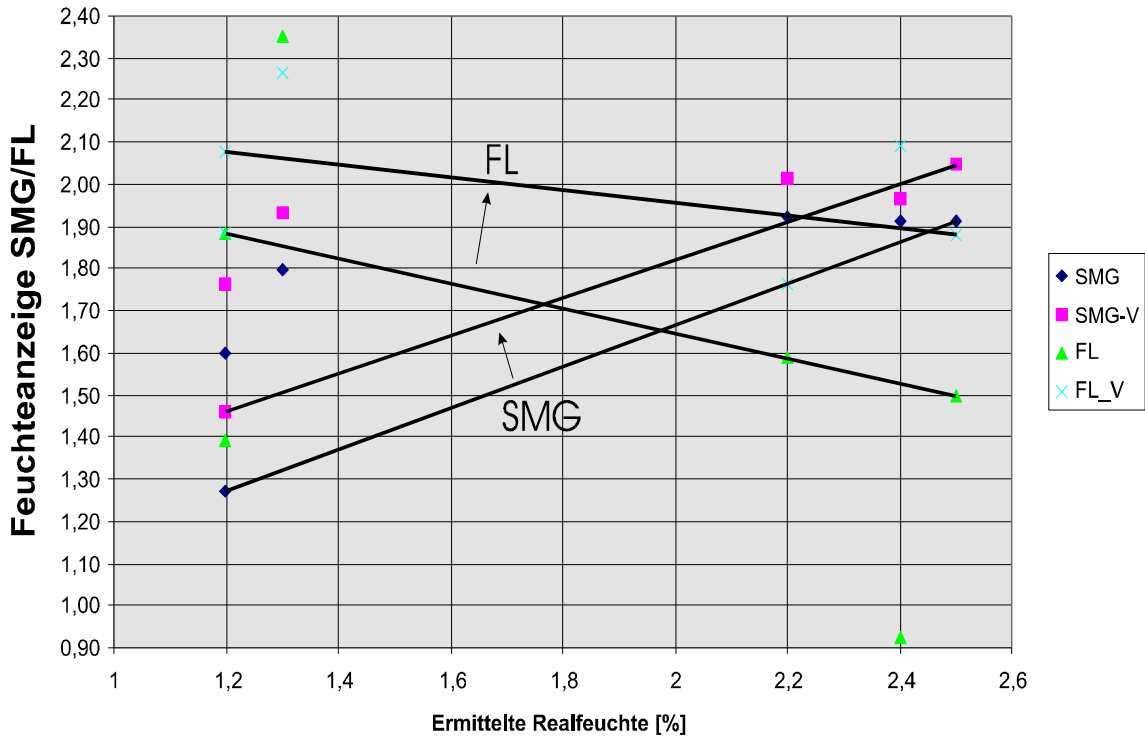


Abb. 50 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Bentonit D, unverdichtet und verdichtet, für beide Feuchtemessgeräte

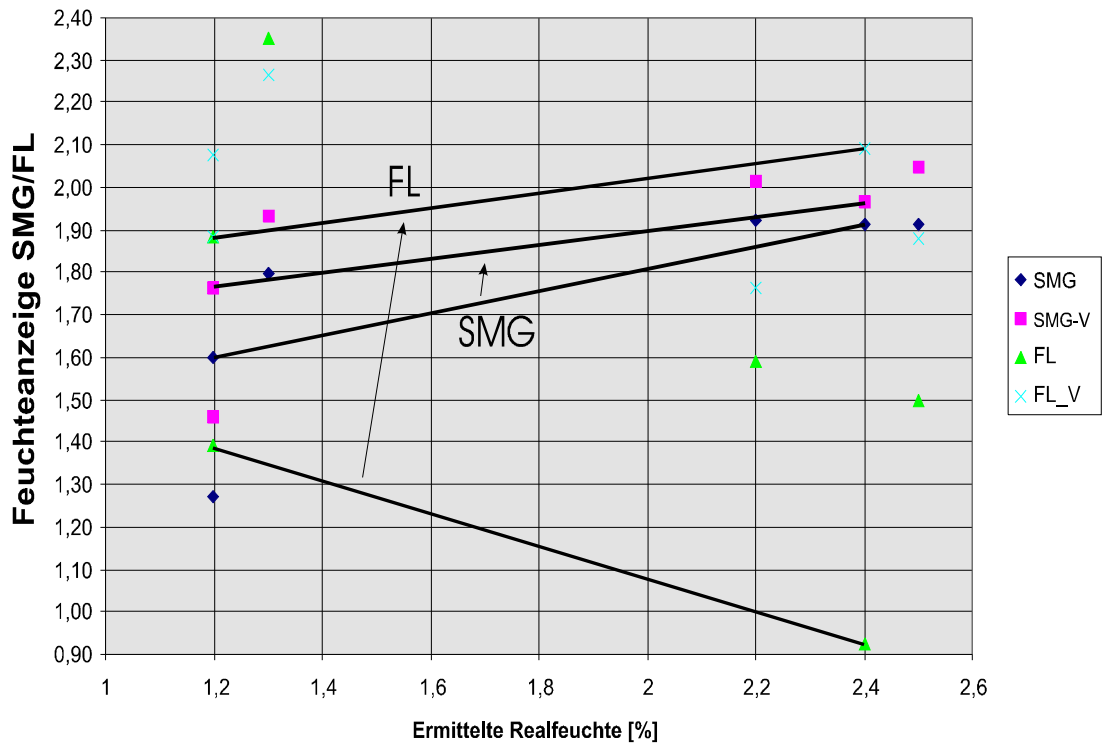


Abb. 51 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Bentonit E, unverdichtet und verdichtet, für beide Feuchtemessgeräte

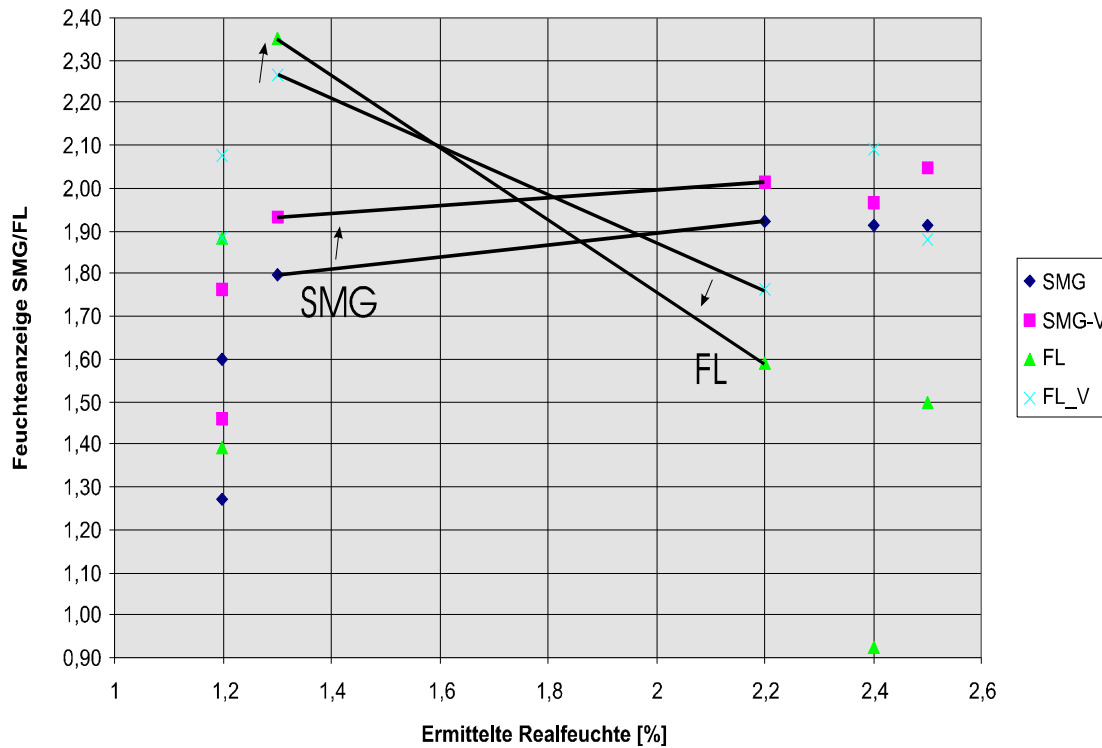


Abb. 52 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Bentonit SR, unverdichtet und verdichtet, für beide Feuchtemessgeräte

Auffällig bei allen diesen Messungen ist die breite Streuung der gemessenen Werte, wobei häufig sogar eine Umkehrung der Kurvenverläufe auftrat, so das bei steigender Realfeuchte des Formstoffs eine geringere Feuchte angezeigt wurde. Dies ist durch den Versuchsablauf zu erklären, da bei steigender Formstofffeuchte die Verdichtbarkeit des Formstoffs zunimmt. Entsprechend sinkt aber auch die Schüttdichte des unverdichteten Formstoffs, so das eine kleinerer Feuchtemesswert angezeigt wird. Auch eine Verdichtung um 10 % (bestimmt als Volumenabnahme) konnte diesen Effekt nicht ausgleichen.

Das unterschiedliche Verhalten beider Messgeräte kann auch durch den Messaufbau erklärt werden. Der relativ kompakte Mikrowellenmesskopf war eben abschließend in die Deckplatte des Messgefäßes eingelassen, wodurch nach dem Einsieben des Formstoffs das manuelle Einebnen der Formstoffoberfläche bzw. das Eigengewicht der Deckplatte eine gewisse Verdichtung direkt vor dem Messkopf bewirkt haben kann. Im Gegensatz dazu standen die Plattenelektroden des Leitfähigkeits-Messgerätes senkrecht im Messgefäß, erfassten also ein größeres Messvolumen.

Auch diese Versuche zeigen die Wichtigkeit der Wahl des Einbauorts für die Feuchtemesseinrichtung. Es ist ungünstig, einen Ort zu wählen, an dem der Formstoff unverdichtet vorliegt, da dann der Einfluss der Schüttdichte besonders groß ist. Bentonitkonzentration- und Art haben auch einen Einfluss auf den ermittelten Messwert, so das die Feuchtemesseinrichtung jedenfalls auf den vorhandenen Formstoff und den Einbauort abgeglichen werden muss.

### 4.2.3 Einfluss der Ionenkonzentration im Wasser bzw. Formstoff

Es wurde eine Reihe von Prüfmischungen erstellt :

- Quarzsand H32            7000g
- Wasser                    350 ml (5 %)
- Bentonit Geko 1 %    70 g
- Kochsalz                 0 bis 1 % in Stufen

Die Prüfmischungen wurden dann über beide Feuchtemessgeräte beurteilt, wobei bei beiden Messgeräten keine vorherige Kalibrierung erfolgte, da nur die Änderung der gemessenen Feuchten bei zusätzlicher Salzfracht im Wasser bzw. Formstoff untersucht werden sollte. Die Bestimmung der Feuchte wurde bei unverdichtetem Formstoff durchgeführt (Siebung des Formstoffs durch ein Sieb der Maschenweite 3 mm). Dabei wurde im Gegensatz zur vorigen Versuchsreihe der Messkopf des Feuchtemessgerätes Franz Ludwig bündig in den Boden des Probebehälters eingelassen, um einen eventuellen Einfluss der Formstoffaustrocknung an der Oberfläche der Formstoffprobe auszuschließen, und um einen innigen Kontakt zwischen Messkopf und Formstoff sicherzustellen.

<b>Mischung ohne Zusatz von Salz :</b>					<b>Mittelwert</b>
SMG	3,60	3,80	3,55	3,85	<b>3,70</b>
FL unverdichtet	0,98	0,90	0,84	0,91	<b>0,91</b>
FL verdichtet	1,28	1,28	1,30	1,28	<b>1,28</b>
<b>Zusatz von 0,2% Kochsalz vom Wasser = 0,7g</b>					<b>Mittelwert</b>
SMG	6,90	6,90	7,10	7,05	<b>6,99</b>
FL unverdichtet	1,15	1,10	1,23	1,27	<b>1,19</b>
FL verdichtet	1,40	1,42	1,37	1,44	<b>1,41</b>
<b>Zusatz von 0,5% Kochsalz vom Wasser = 1,75g</b>					<b>Mittelwert</b>
SMG	8,66	8,29	8,45	8,60	<b>8,50</b>
FL unverdichtet	1,24	1,32	1,32	1,24	<b>1,28</b>
FL verdichtet	1,51	1,54	1,54	1,59	<b>1,54</b>
<b>Zusatz von 1% Kochsalz vom Wasser = 3,5g</b>					<b>Mittelwert</b>
SMG	9,50	9,22	9,40	9,05	<b>9,29</b>
FL unverdichtet	1,22	1,42	1,22	1,31	<b>1,29</b>
FL verdichtet	1,53	1,58	1,58	1,56	<b>1,56</b>

Tab. 6 : Einfluss der Zugabe von Kochsalz auf die Bestimmung der Formstoff-Feuchte

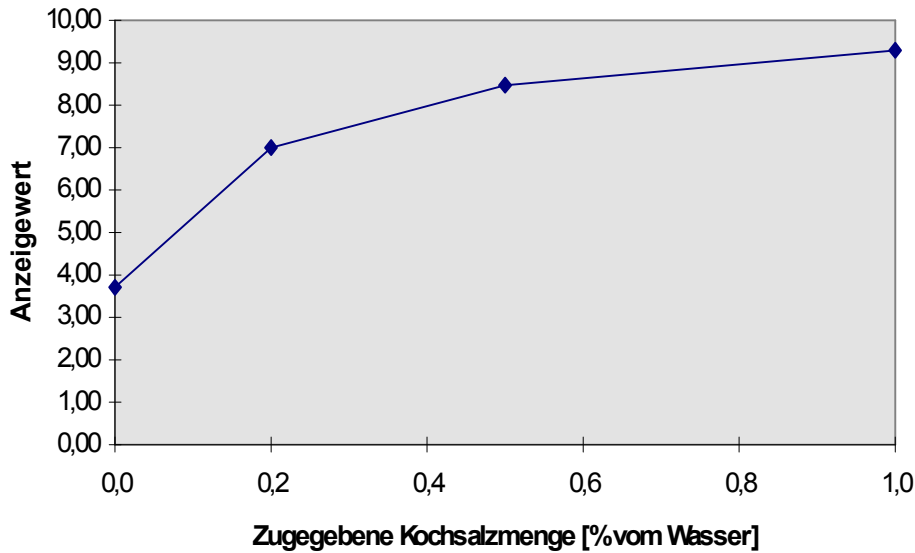


Abb. 53 : Anzeige des Feuchtemessgerätes SMG bei Zugabe von Kochsalz

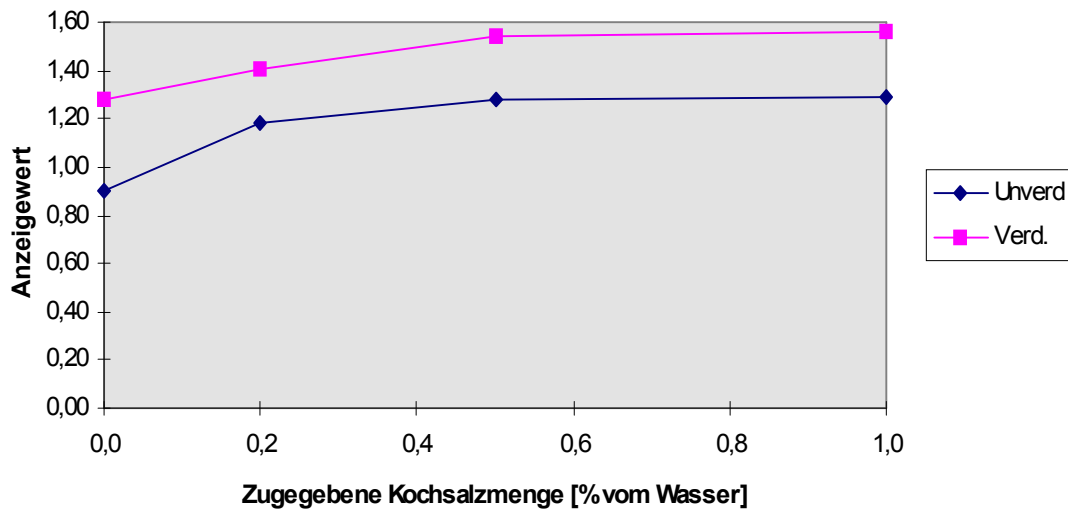


Abb. 54 : Anzeige des Feuchtemessgerätes Ludwig bei Zugabe von Kochsalz

Der deutliche Einfluss der Kochsalzzugabe auf die Messgerätes der Fa. SMG, also auf die Bestimmung der Formstoffleitfähigkeit, war so zu erwarten, da die Ionen im Wasser der Träger der Leitfähigkeit sind. Aber auch die Mikrowellenmesssonde zeigt einen entsprechenden Einfluss, wenn auch in geringerem Maße.

Die Ionenkonzentration, die sich in einem Formstoffkreislauf einstellt, wird bestimmt durch den Ioneneintrag (durch Frischwasserzulauf, z. B. zur Formstoffkühlung bzw. zur Einstellung der Formstofffeuchte, aber auch durch Inhaltsstoffe der Formstoffzusätze wie Bentonite oder Glanzkohlenstoffbildner) und dem entsprechenden Austrag, z. B. mit dem Feinstaub, Knollen- bzw. Altsandentnahme. Diese Parameter sind nicht einfach steuerbar, man kann allenfalls den Eintrag durch das Frischwasser durch die Wahl einer entsprechenden Quelle reduzieren.

Eine Änderung des Ionenein- oder -austrags führt daher immer zu einer langsamen Änderung der Ionenkonzentration im Umlaufsand, was während dieser Phase eine permanente Neukalibrierung der Feuchtemesseinrichtungen notwendig machen kann.

#### 4.2.4 Vergleich des Verdichtbarkeitsmessgerätes mit Laborprüfgeräten anhand von Prüfmischungen

Dazu wurden Prüfmischungen, bestehend aus Quarzsand, Bentonit und Wasser hergestellt. Zur Untersuchung standen 3 verschiedene Bentonitsorten der Fa. IKO Erbslöh zur Verfügung :

- D** Griechischer Bentonit, natürliche Aktivierung,
- Q** Quickbond, Bentonit mit Zusatz von Prozesskohlenstoff,
- SR** Sardischer Bentonit, nicht aktiviert.

Jede dieser Sorten wurde bei drei verschiedenen Formstoff-Feuchten beurteilt.

Dazu wurden Prüfmischung hergestellt, bestehend aus :

Quarzsand H32	5000 g
Bentonit, 3 verschiedene	50 g (1%), 100 g (2%), 150 g (3%)
Wasser	50 g (1%), 100 g (2%), 150 g (3%)

und im Labormischer (Kollergang, Fa. GF) aufbereitet (1 Minute Homogenisierungszeit, 7 min Mischzeit nach Zugabe des Wassers).

Die so hergestellten Prüfmischungen wurden mit Hilfe anerkannter Laborprüfgeräte auf die Parameter Formstoff-Feuchte, Verdichtbarkeit, Scherfestigkeit und Schüttgewicht untersucht. (Zwei- bzw. Dreifachbestimmung).

Der verbleibende Rest der Prüfmischung wurde dann komplett mit dem neuentwickelten Verdichtbarkeitsmessgerät untersucht, wobei die Daten der einzelnen Messungen über das Steuerprogramm dokumentiert wurden. Für jeden einzelnen Prüfvorgang wurde dabei zusätzlich zur Bestimmung der genormten Verdichtbarkeit auch die Verdichtbarkeits/Druck-Kennlinie erfasst, und es wurde die Verdichtbarkeit nach Anlegen eines Vordrucks von 1 Bar bestimmt. Dies sollte dazu genutzt werden, durch diese Vorverdichtung eventuell vorhandene Hohlräume im Formstoff auszugleichen. Solche Hohlstellen können eventuell bei nicht sorgfältigem und gleichmäßigem Einsieben des Formstoffs in die Prüfkörperhülse entstehen und täuschen dann eine höhere Verdichtbarkeit vor. Da die Probenahme bei einem Einsatz im Betrieb automatisch erfolgen soll, musste mit Schwierigkeiten bei der Probenahme und Füllung der Hülse gerechnet werden.

In den folgenden Diagrammen (Abb. 55, Abb. 56) werden die ermittelten Verdichtbarkeiten und Scherfestigkeiten mit den entsprechenden Werten der Labormessgeräte verglichen. Die zugehörigen Formstoffdaten und Wertetabellen befinden sich im Anhang.

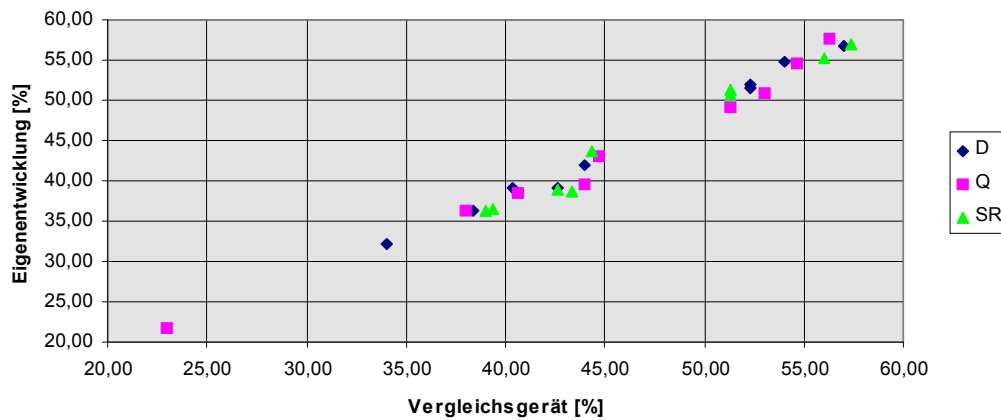


Abb. 55 :Vergleich Verdichtbarkeit Eigenentwicklung / Vergleichsgerät

Der Vergleich der Verdichtbarkeiten, gemessen mit dem neuentwickelten automatischen Prüfgerät und dem Laborprüfgerät (Fabrikat GF) zeigt für alle Formstoffproben eine recht gute Übereinstimmung.

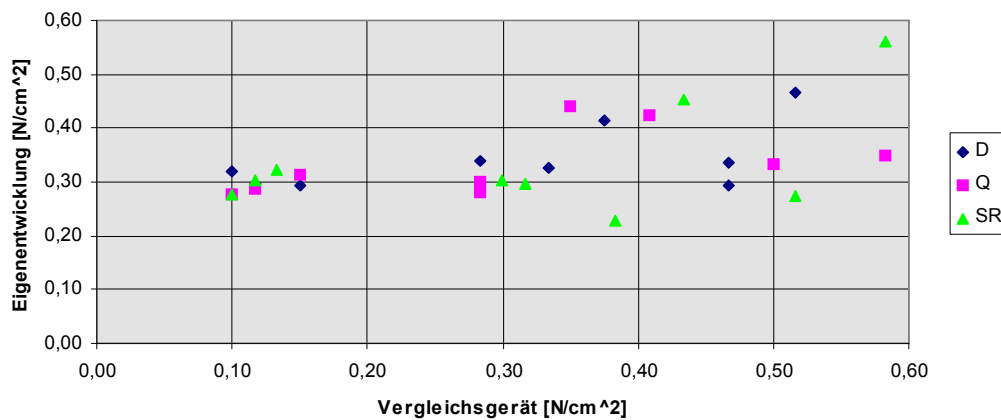


Abb. 56 :Vergleich Scherfestigkeit Eigenentwicklung / Vergleichsgerät

Im Gegensatz dazu kann mit dem neuentwickelten Gerät eine Bestimmung der Scherfestigkeit des Formstoffs nicht sicher durchgeführt werden. Die Reibung der Bodenplatte, die zum Abscheren des Prüfkörpers bewegt wird, überdeckt völlig die notwendige Scherkraft, insbesondere bei den zu erwartenden geringen Festigkeiten im Altsand. Abhilfe könnte eine geänderte Lagerung der Bodenplatte schaffen, z. B. mit Gleitlagern geringerer Reibung oder durch eine Rollenbahn. Dies ließ sich aber nicht durch einen Umbau des vorhandenen Prototypen testen.



Eine Auswertung jeder einzelnen Messung ergibt die Häufigkeitsverteilung in Abb. 57, wobei als Auswertungskriterium die Abweichung vom Mittelwert aller Messungen einer jeder Probe benutzt wurde.

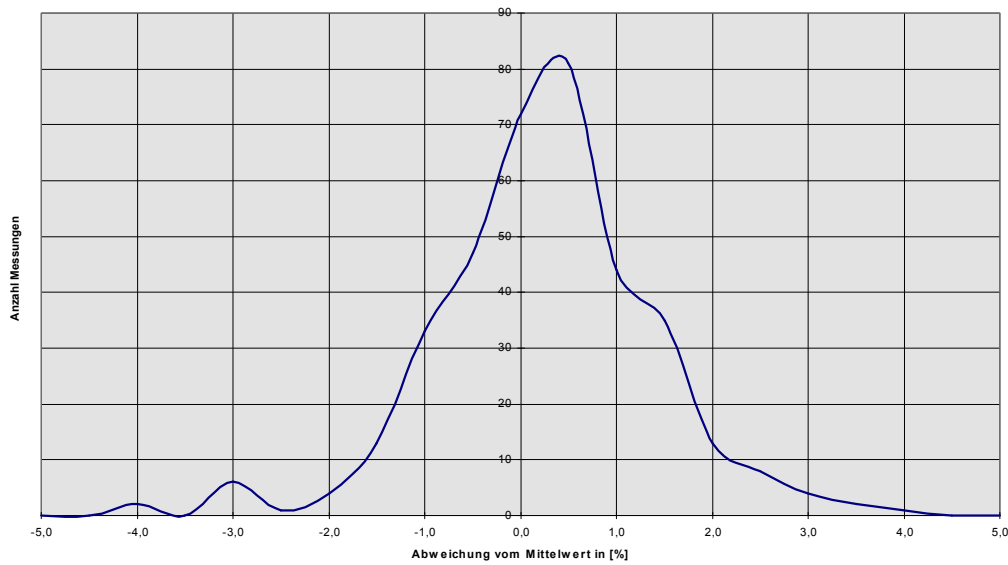


Abb. 57 : Häufigkeitsverteilung (Streuung) aller durchgeführten Messungen,  
bezogen auf den Mittelwert jeder Charge

Berücksichtigt man weiter, dass die Ablesegenauigkeit des GF-Vergleichsgerätes 1 % Verdichtbarkeit ist, so zeigen die Versuche die Praxistauglichkeit des neuen Prüfgerätes zur Bestimmung der Verdichtbarkeit.

Bei der Untersuchung der Formstoffproben wurden die Prüfkörperreste beim Ausstoßen aus dem Prüfgerät manuell aufgefangen und deren Gewicht mit Hilfe einer elektronischen Waage bestimmt. Die so gemessenen Gewichte wurden über eine serielle Schnittstelle zum Steuerrechner des Verdichtbarkeitsmessgerätes übermittelt und zusammen mit den anderen Messdaten gespeichert. Auch die mit Hilfe des Vergleichsgerätes erstellten Prüfkörper wurden gewogen, wobei die Ergebnisse, wie auch die Ergebnisse der Verdichtbarkeits- und Scherfestigkeitsmessungen, durch manuelle Aufschreibungen dokumentiert wurden.

Die folgenden Diagramme (Abb. 58 - Abb. 60) zeigen den Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Prüfkörperdichte. Die entsprechenden Wertetabellen befinden sich im Anhang.

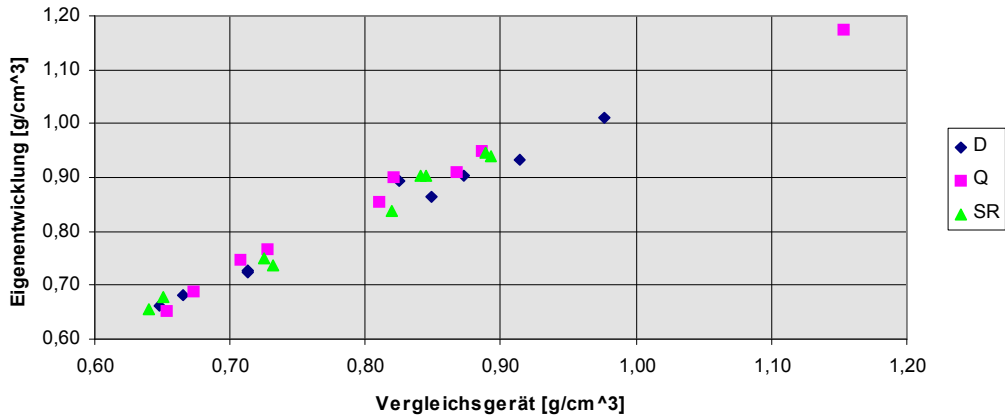


Abb. 58 : Vergleich Dichte des Prüfkörpers Eigenentwicklung / Vergleichsgerät

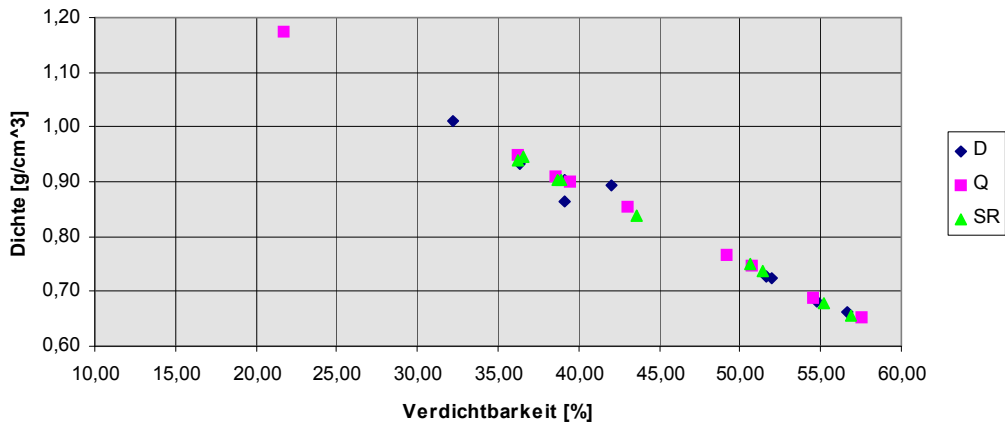


Abb. 59 : Gegenüberstellung Verdichtbarkeit/Dichte Eigenentwicklung

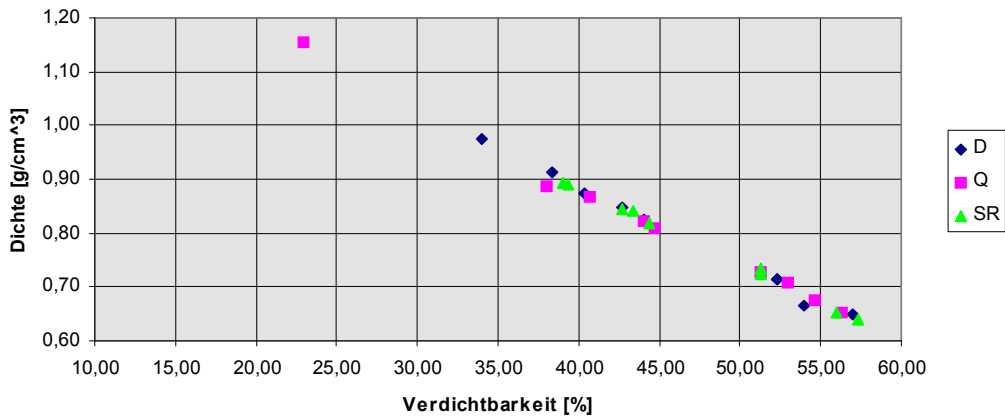


Abb. 60 : Gegenüberstellung Verdichtbarkeit/Dichte Vergleichsgerät GF

Beim Füllen der Prüfkörperhülse im neuentwickelten Prüfgerät steht diese auf einer flachen Bodenplatte. Sie wird locker mit Formstoff gefüllt, und während des Verschiebens unter den Verdichtungsstempel wird überschüssiger Formstoff mit Hilfe eines Abstreifbleches entfernt, so dass der unverdichtete Prüfkörper eine Höhe von 144 mm besitzt. Unter Vernachlässigung der Sandverluste zwischen Prüfkörperhülse und Bodenplatte kann aus dem Prüfkörpergewicht und dem Volumen des unverdichteten Prüfkörpers die Schüttdichte des Formstoffs bestimmt werden.

Bei der Erstellung der Prüfkörper für das Vergleichsgerät GF wird das untere Ende der Prüfkörperhülse dagegen durch einen Sockel verschlossen, der den Innenraum der Hülse auf 100mm beschränkt. Entsprechend sind bei gleicher Verdichtbarkeit und Schüttdichte die so erstellten Prüfkörper kleiner und leichter. Um trotzdem einen Vergleich der beiden Messgeräte zu erlauben wurden die Schüttdichten bestimmt, als Dichte der unverdichteten Prüfkörper.

Ein Vergleich der gemessenen Schüttdichten mit den zugehörigen Verdichtbarkeiten zeigt einen nahezu linearen Zusammenhang (Abb. 59; Abb. 60), sowohl für das Verdichtbarkeitsmeßgerät als auch für das GF-Laborprüfgeräts. Da auch die Versuche mit unterschiedlichen Betriebsformstoffen diesen Zusammenhang bestätigten, wurde das Prüfkörpergewicht (bzw. die Schüttdichte) nicht zur Regelung der Formstoffaufbereitung im Betrieb herangezogen.

Die Füllung der Prüfkörperhülse erfolgte bei den Laborversuchen durch ein Metallsieb mit 0,3 mm Maschenweite, entsprechend der Herstellung der Normprüfkörper für das Vergleichsgerät. Wegen des größeren Trichters und Siebes, und auch der größeren effektiven Höhe der Prüfkörperhülse, ist aber die Fallhöhe größer. Beim Einsatz als vollautomatisches Prüfgerät muss auch die Probenahme automatisch erfolgen, so dass eventuell mit einer ungleichmäßigen Füllung der Prüfkörperhülse gerechnet werden muss. Beim manuellen Füllen der Hülse war manchmal zu erkennen, dass der sich bildende Schüttkegel plötzlich in Bewegung gerät und zusammensackt, um Hohlräume im unteren Bereich der Hülse zu füllen. Das Vorhandensein solcher Hohlräume ist auch nach dem vollständigen Füllen der Prüfkörperhülse nicht auszuschließen. Daher wurde auch untersucht, ob durch das Anlegen eines geringeren Verdichtungsdrucks von 1 Bar im Pneumatiksystem, entsprechend einem Verdichtungsdruck im Formstoff von 40 N/cm<sup>2</sup> solche Hohlräume beseitigt werden können. Der Verdichtungsweg nach Anlegen dieses Vordrucks wurde dann als Basis zur Berechnung der weiteren Verdichtbarkeit benutzt, wobei der normgerechte Verdichtungsdruck von 100 N/cm<sup>2</sup> benutzt wurde. Es zeigte sich allerdings, dass schon nach Anlegen des Vordrucks mehr als 96 % der Verdichtung des Formstoffs erreicht wurden. Die messbare weitere Verdichtung des Formstoffs liegt im Bereich der Messgenauigkeit und zeigt keine auswertbaren Abhängigkeiten von weiteren Formstoffparametern (Abb. 61, Wertetabelle im Anhang).

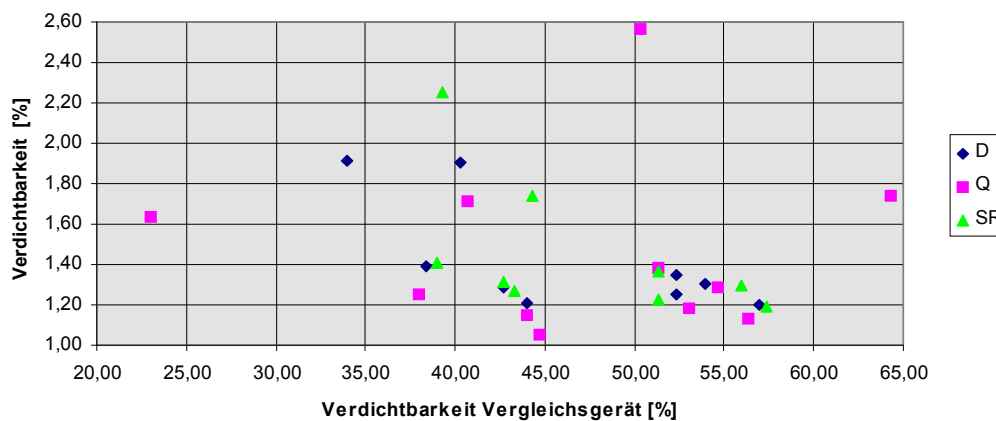


Abb. 61 : Verdichtbarkeit nach Anlegen eines Vordrucks von 1 Bar

### **4.3 Untersuchung der Betriebsformstoffe der beteiligten Gießereien**

Es wurden in den drei beteiligten Gießereien Formstoffproben aus der laufenden Produktion entnommen. Im Formstofflabor der Gerhard-Mercator-Universität Gesamthochschule Duisburg wurden diese Formstoffe bei unterschiedlichen Feuchten und Zugaben von Bentonit untersucht.

Dazu wurden Prüfmischung hergestellt, bestehend aus :

Formstoffprobe 5000 g

Bentonit, keine Zugabe, 50 g (1%), 100g (2%)

Wasser keine Zugabe, 50 g (1%), 100g (2%), Trocknung gegenüber Betriebszustand

und im Labormischer (Kollergang, Fa. GF) aufbereitet (1 Minute Homogenisierungszeit, 7 min Mischzeit nach Zugabe des Wassers).

Die so hergestellten Prüfmischungen wurden mit Hilfe marktüblicher Prüfgeräte auf die Parameter Formstoff-Feuchte, Verdichtbarkeit, Scherfestigkeit und Schüttgewicht untersucht. (Zwei- bzw. Dreifachbestimmung).

Der verbleibende Rest der Prüfmischung wurde dann komplett mit dem neuentwickelten Verdichtbarkeitsmessgerät untersucht, wobei die Daten der einzelnen Messungen über das Steuerprogramm dokumentiert wurden. Für jeden einzelnen Prüfvorgang wurde dabei zusätzlich zur Bestimmung der genormten Verdichtbarkeit auch die Verdichtbarkeits/Druck-Kennlinie erfasst, und es wurde die Verdichtbarkeit nach Anlegen eines Vordrucks von 1 Bar bestimmt, um eventuell eine unterschiedliche Füllichte der Prüfkörperhülse ausgleichen zu können

Es stand genügend Formstoff zur Verfügung, um jede Prüfmischungen aus den Einzelkomponenten getrennt herzustellen. Daher konnten Einflüsse durch wiederholte Aufbereitung ausgeschlossen werden.

Bei Verfügbarkeit des Feuchtemessgerätes der Fa. Franz Ludwig wurde die Formstoff-Feuchte der Proben zusätzlich mit diesem Gerät ermittelt.

Vers Nr.	Gießerei	Bent. Menge %	Wasser Menge %	Verd. gem. %	Scherf. gem N/cm <sup>2</sup>	Dichte gem. g/cm <sup>3</sup>	Nach Vorverd. g/cm <sup>3</sup>	Verd. GF %	Scherf. GF N/cm <sup>2</sup>	Dichte GF g/cm <sup>3</sup>	Feuchte Wägung %	Feuchte Ludwig %
19	AE Goetze	0	0	23,7	4,96	1,10	3,77	26,3	2,47	1,05	2,59	1,28
20	AE Goetze	0	1	51,8	5,56	0,70	2,80	56,7	4,10	0,61	3,21	0,86
21	AE Goetze	0	2	68,2	5,01	0,48	1,71	69,7	2,63	0,43	4,42	0,81
31	AE Goetze	0	Tr					21,3	1,95	1,11	2,27	
25	AE Goetze	1	0	21,4	4,07	1,14	3,25	21,3	2,10	1,13	2,33	
26	AE Goetze	1	1	44,6	6,13	0,80	3,31	48,3	5,52	0,73	3,60	
27	AE Goetze	1	2	67,1	4,82	0,50	2,13	69,0	2,17	0,44	4,48	
32	AE Goetze	1	Tr					21,7	2,18	1,12	2,36	
22	AE Goetze	2	0	23,8	5,11	1,12	3,25	24,3	2,33	1,08	2,59	1,38
23	AE Goetze	2	1	48,2	6,75	0,76	3,10	52,3	5,23	0,67	3,34	0,86
24	AE Goetze	2	2	66,8	6,27	0,50	2,21	69,0	4,19	0,44	4,31	0,77
1	Georg Fischer	0	0	25,2	5,44	1,08	4,33	25,3	2,50	1,05	3,01	2,01
2	Georg Fischer	0	1	47,7	7,58	0,76	4,90	49,3	5,53	0,72	4,16	1,43
3	Georg Fischer	0	2	64,2	4,59	0,55	3,35	65,0	2,73	0,51	4,73	1,43
33	Georg Fischer	0	Tr	18,9	6,11	1,19	4,35	20,0	1,60	1,16	2,57	
7	Georg Fischer	1	0	21,4	3,58	1,14	3,63	22,7	2,00	1,11	2,85	2,08
8	Georg Fischer	1	1	41,4	6,72	0,85	4,80	44,3	5,60	0,79	3,88	1,85
9	Georg Fischer	1	2	58,1	7,61	0,64	4,07	59,3	5,03	0,59	4,52	1,68
34	Georg Fischer	1	Tr	20,4	5,11	1,17	3,86	20,0	1,77	1,16	2,67	
4	Georg Fischer	2	0	22,6	4,23	1,14	4,09	23,3	2,37	1,10	3,29	2,17
5	Georg Fischer	2	1	34,8	6,34	0,94	5,30	37,3	5,30	0,88	3,79	1,95
6	Georg Fischer	2	2	56,9	8,03	0,64	4,77	58,7	5,80	0,60	4,74	1,71
10	Woeste	0	0	35,1	5,96	0,92	4,71	37,3	4,70	0,87	3,70	2,27
11	Woeste	0	1	55,8	7,04	0,64	4,28	59,7	5,00	0,57	4,18	1,80
12	Woeste	0	2	66,3	6,47	0,50	3,35	68,7	4,41	0,45	4,87	1,89
35	Woeste	0	Tr	20,1	4,70	1,15	3,79	20,0	2,20	1,14	2,69	
16	Woeste	1	0	20,7	3,67	1,14	3,88	20,7	2,17	1,12	2,89	
17	Woeste	1	1	29,0	5,22	1,03	4,85	30,3	4,23	0,97	3,71	
18	Woeste	1	2	63,6	6,95	0,55	3,48	66,3	3,67	0,48	5,36	
36	Woeste	1	Tr	18,8	4,52	1,17	3,50	19,2	1,93	1,15	2,78	
13	Woeste	2	0	41,6	7,29	0,84	5,55	45,7	6,47	0,76	4,41	1,80
14	Woeste	2	1	54,8	9,06	0,65	5,06	59,3	5,63	0,57	4,25	1,47
15	Woeste	2	2	68,1	7,97	0,47	3,59	69,3	5,98	0,43	4,39	1,68

Tab. 7 : Zusammenfassung der Ergebnisse Betriebsformstoffuntersuchungen

### 4.3.1 Betriebsformstoff AE Goetze

Die Analysen der Formstoffprobe ergaben einen Aktivbentonitgehalt von 6,8 % (bestimmt nach der Methylenblaumethode) und einen Schlammstoffgehalt von 10,4 %

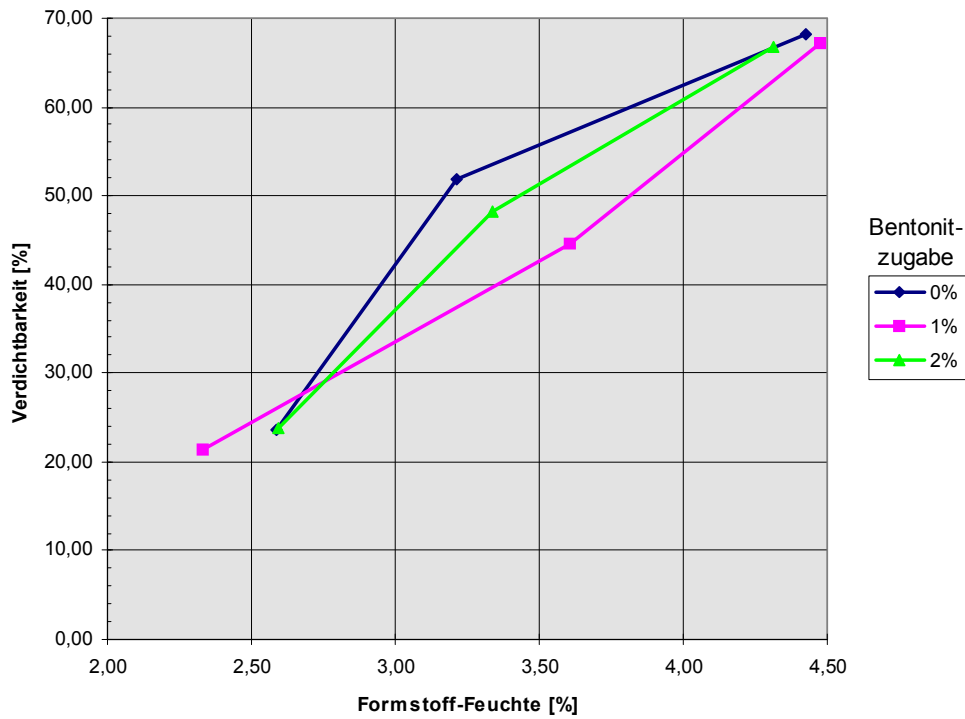


Abb. 62 : Darstellung der Verdichtbarkeit über der Formstoff-Feuchte

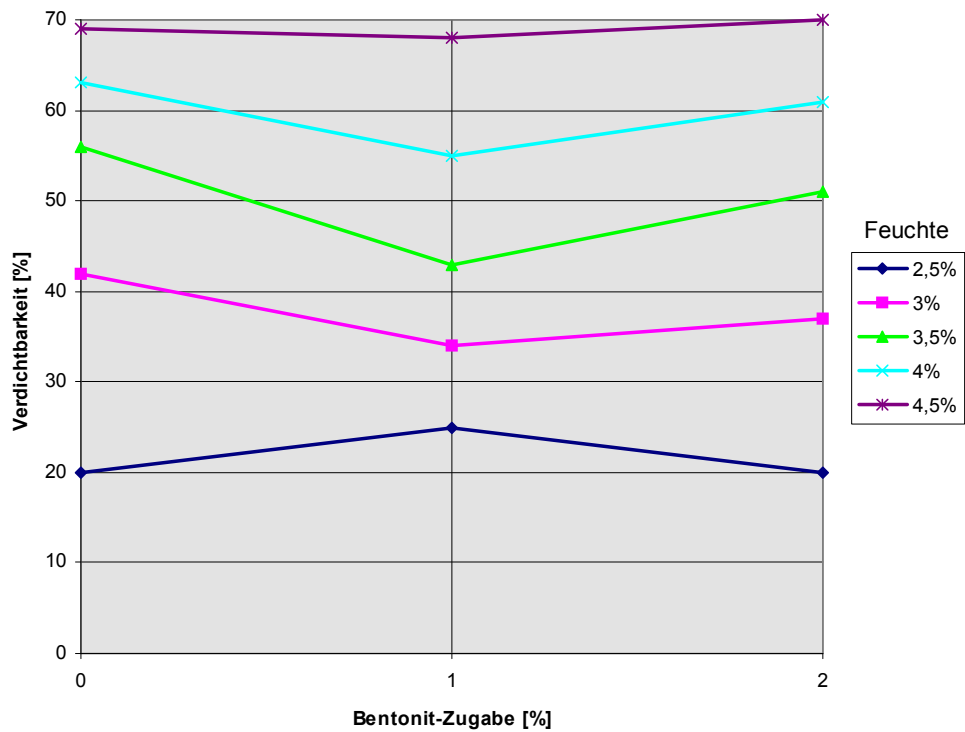


Abb. 63 : Darstellung der Verdichtbarkeit über der Bentonitzugabe, für verschiedene Formstoff-Feuchten

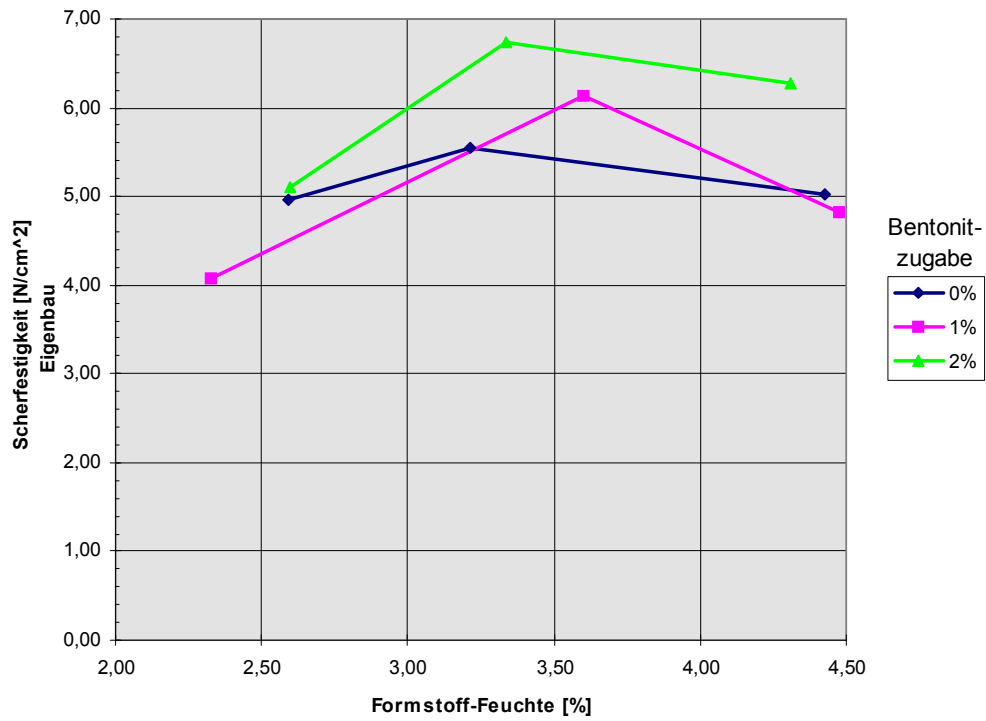


Abb. 64 : Schерfestigkeit für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben, gemessen mit dem Eigenbau-Formstoffprüfgerät

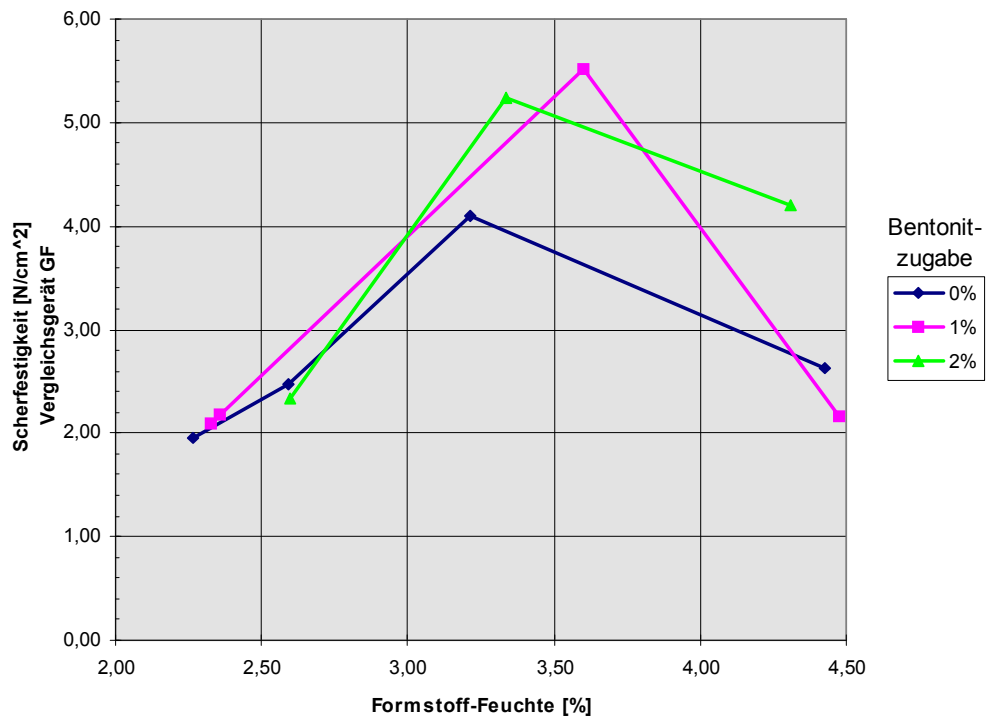


Abb. 65 : Schерfestigkeit für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben, gemessen mit dem Labor-Vergleichsgerät

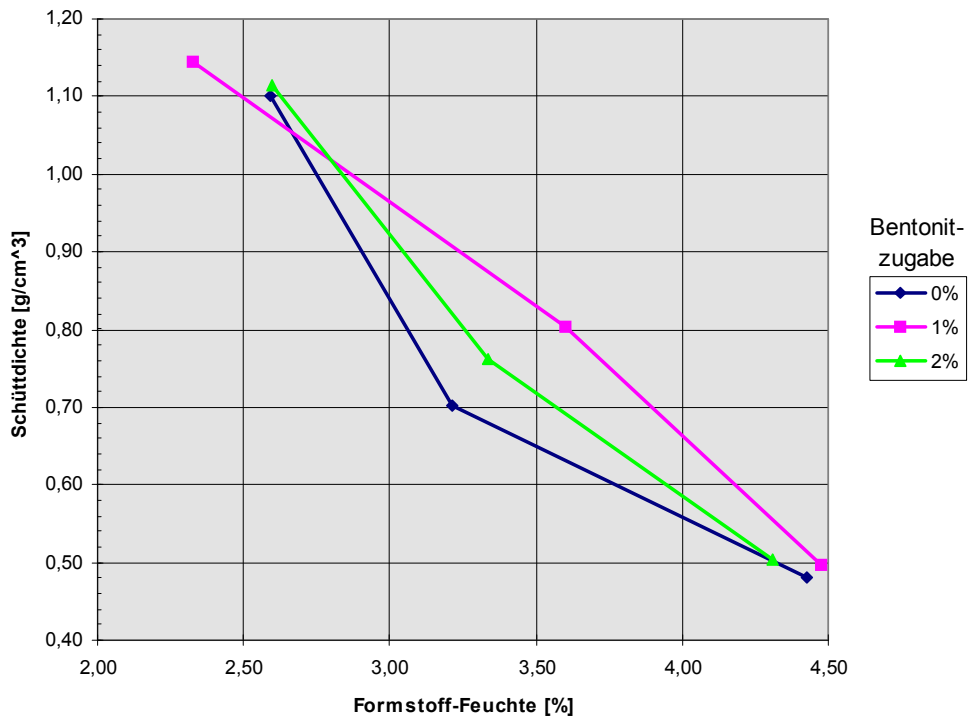


Abb. 66 : Schüttdichte für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben

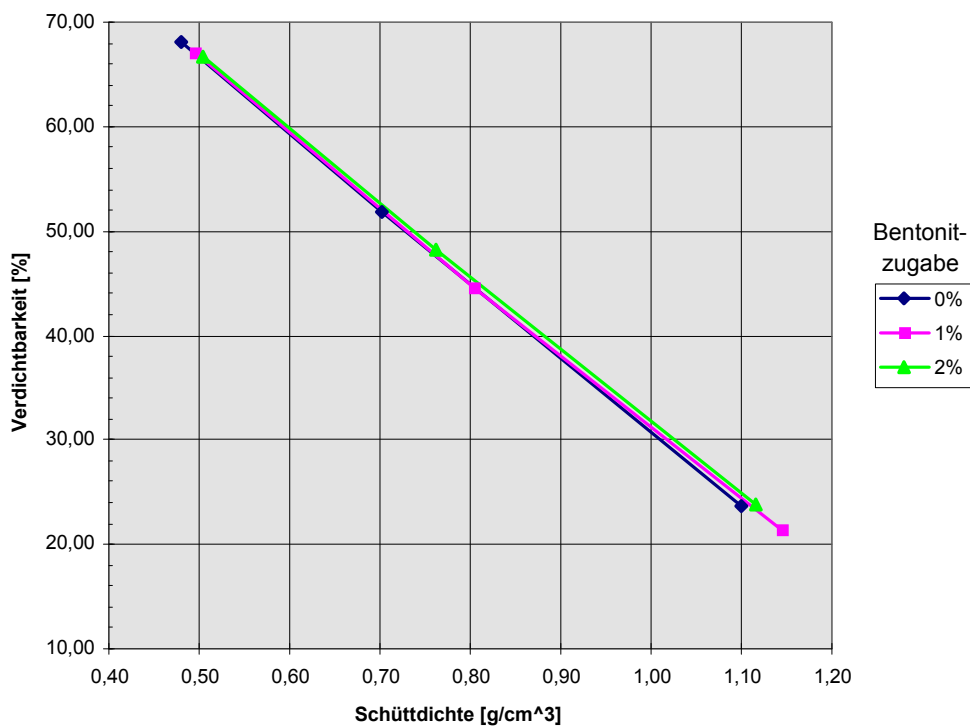


Abb. 67 : Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Schüttdichte



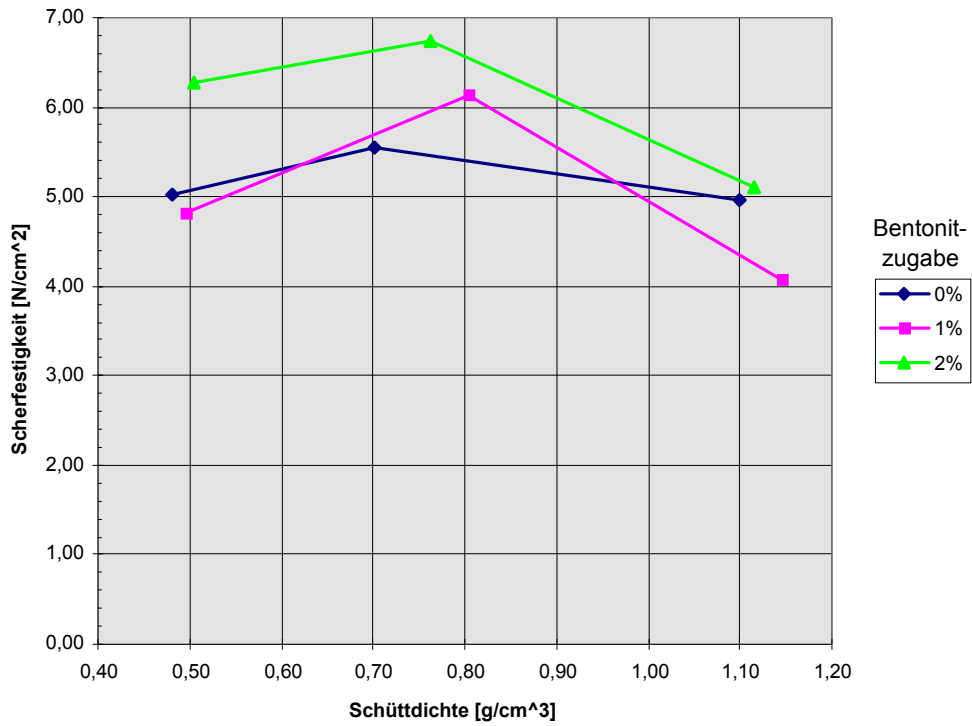


Abb. 68 : Zusammenhang zwischen Schерfestigkeit und Schüttichte

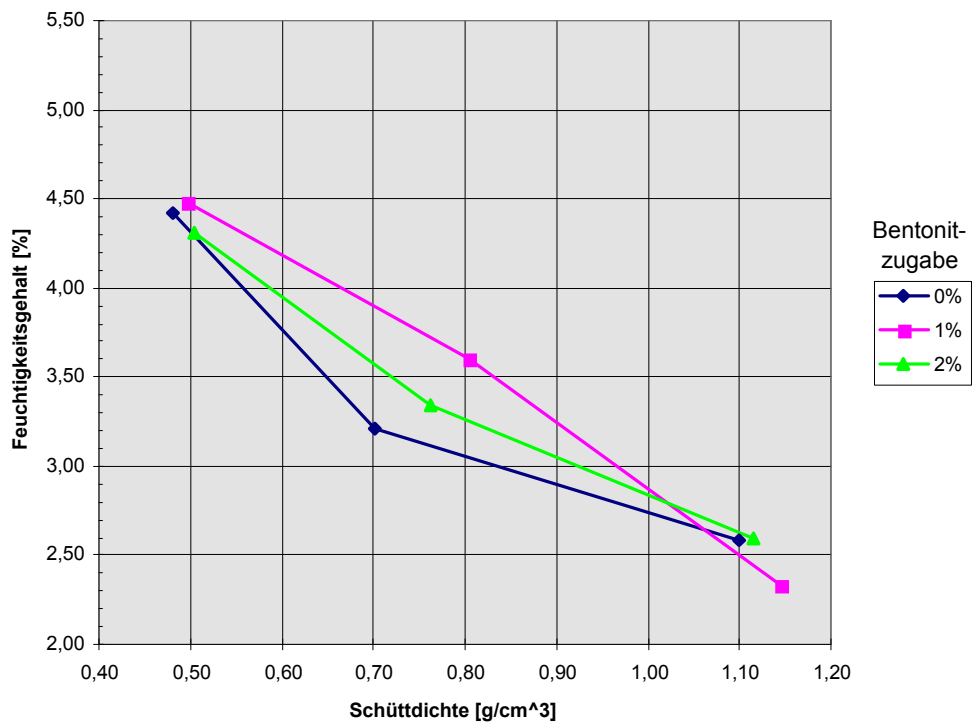


Abb. 69 : Zusammenhang zwischen Formstoff-Feuchte und Schüttichte

### 4.3.2 Betriebsformstoff Georg Fischer

Die Analysen der Formstoffprobe ergaben einen Aktivbentonitgehalt von 8,0 % (bestimmt nach der Methylenblaumethode) und einen Schlammstoffgehalt von 11,6 %

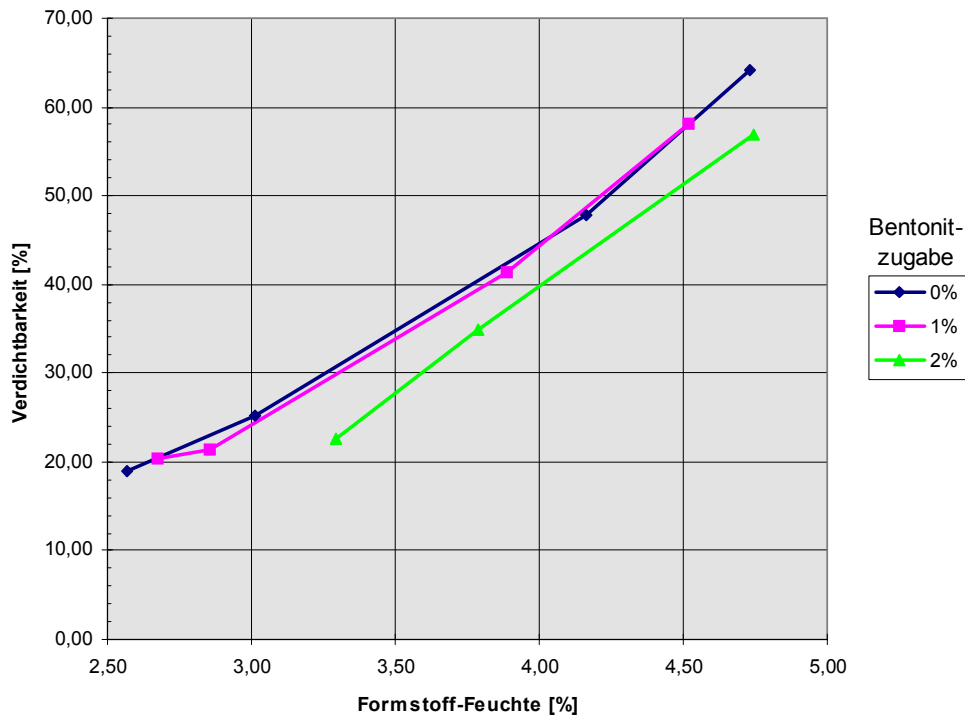


Abb. 70 : Darstellung der Verdichtbarkeit über der Formstoff-Feuchte

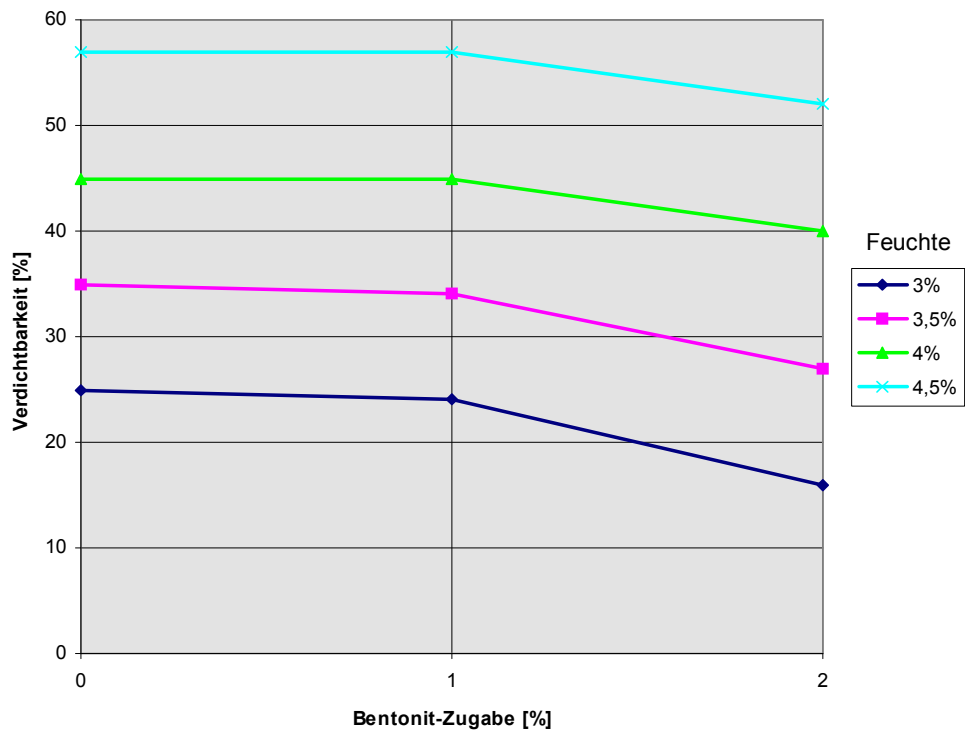


Abb. 71 : Darstellung der Verdichtbarkeit über der Bentonitzugabe, für verschiedene Formstoff-Feuchten

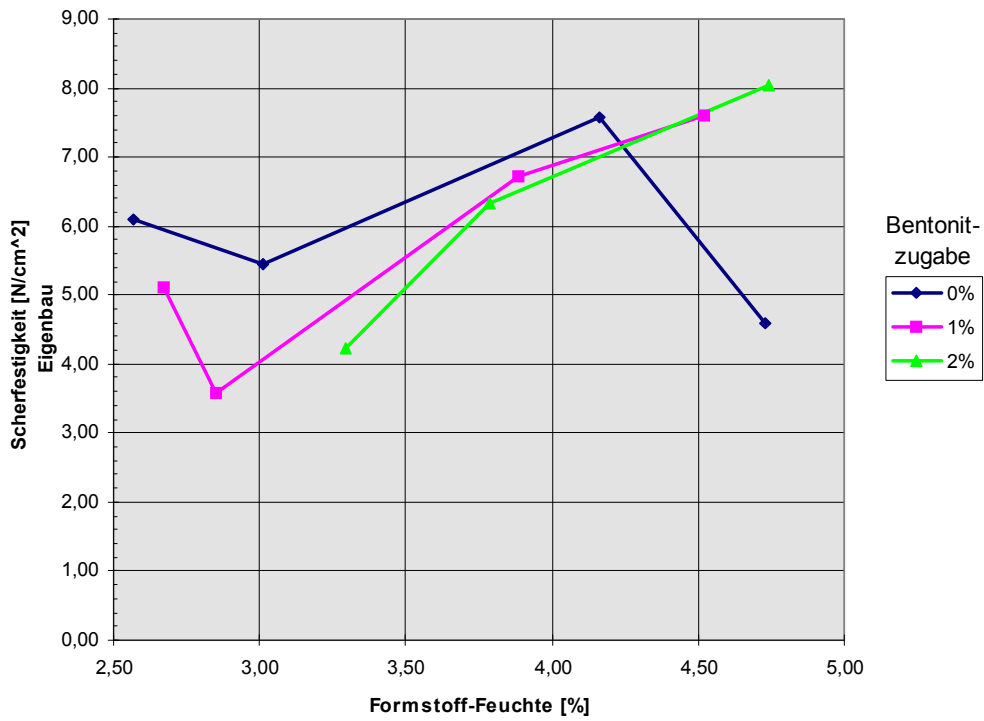


Abb. 72 : Scherfestigkeit für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben, gemessen mit dem Eigenbau-Formstoffprüfgerät

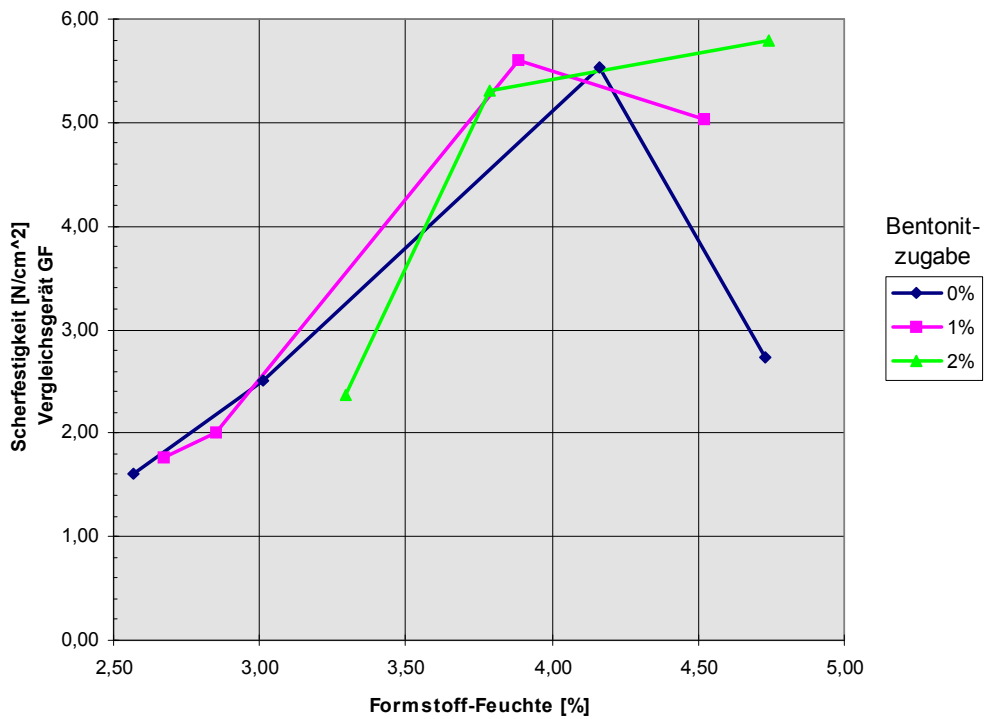


Abb. 73 : Scherfestigkeit für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben, gemessen mit dem Labor-Vergleichsgerät

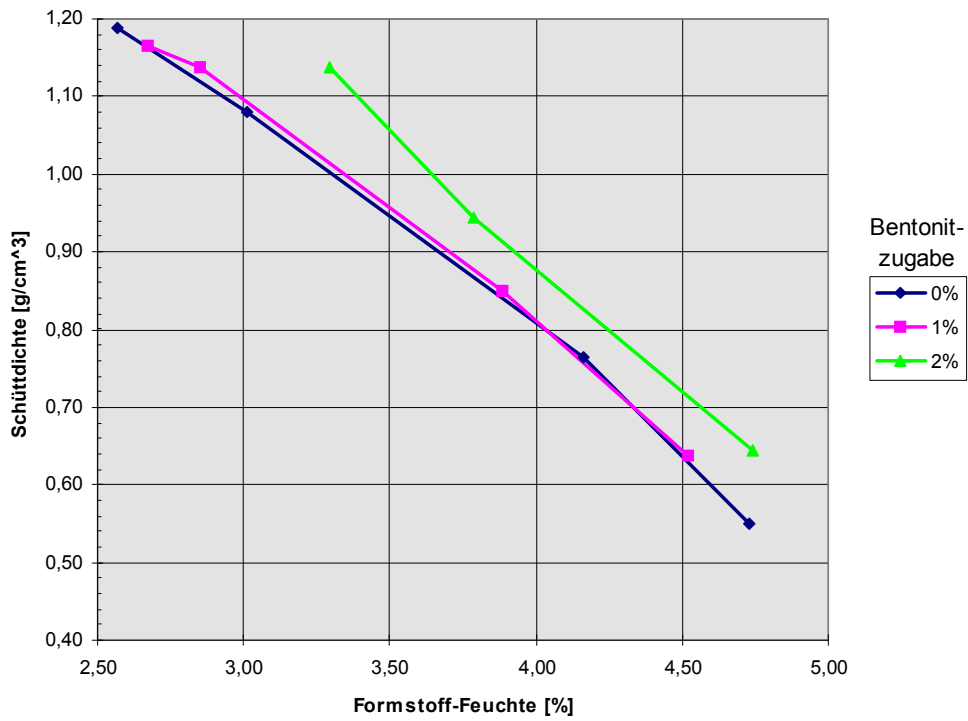


Abb. 74 : Schüttdichte für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben

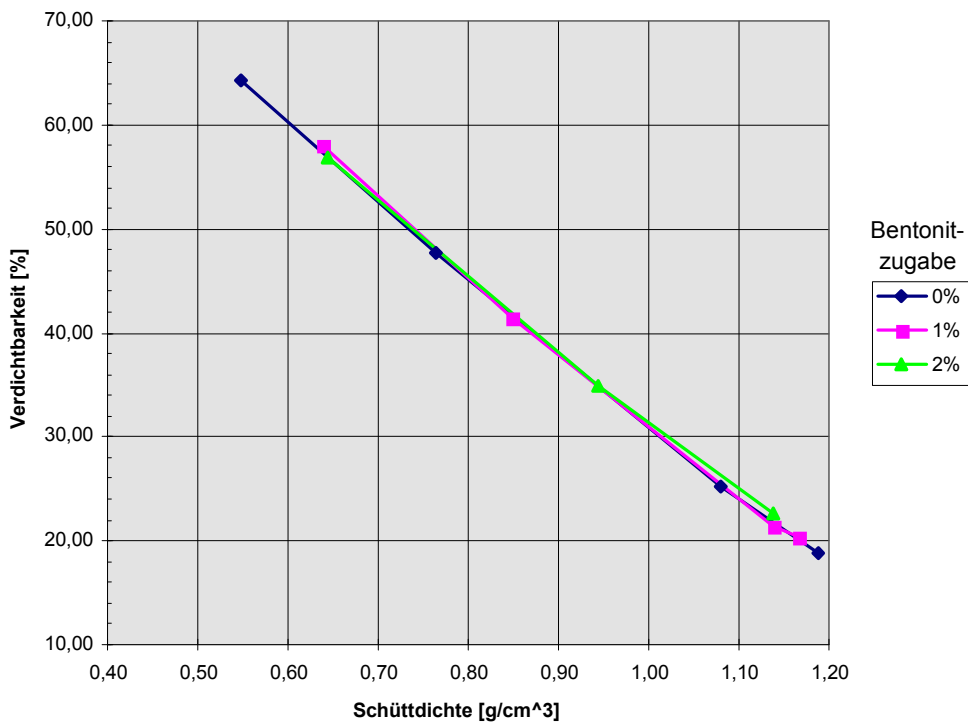


Abb. 75 : Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Schüttdichte

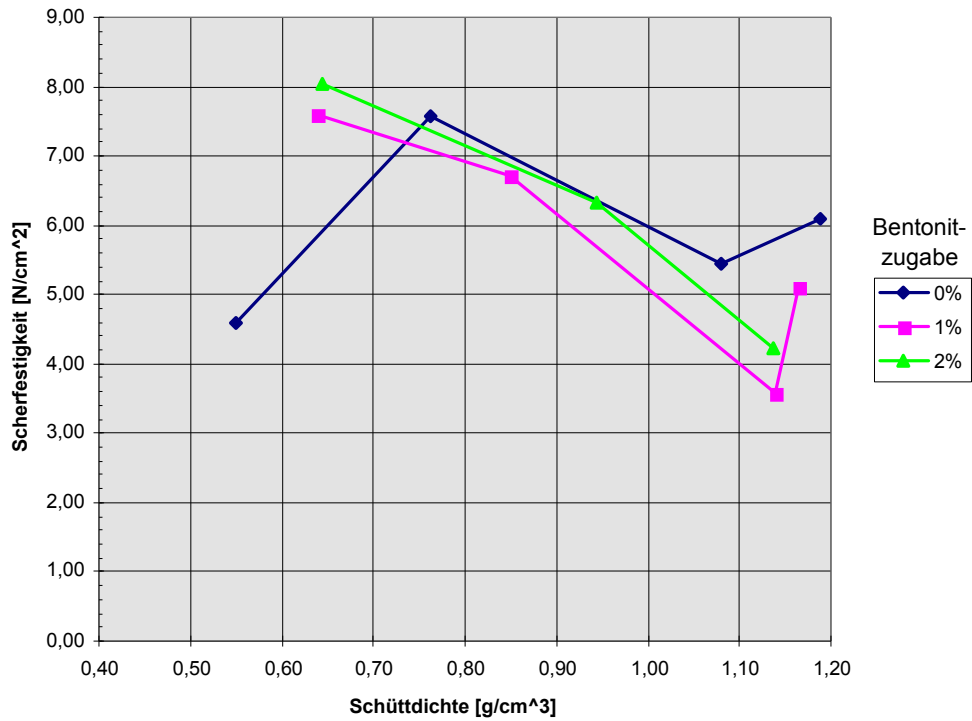


Abb. 76 : Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit und Schüttdichte

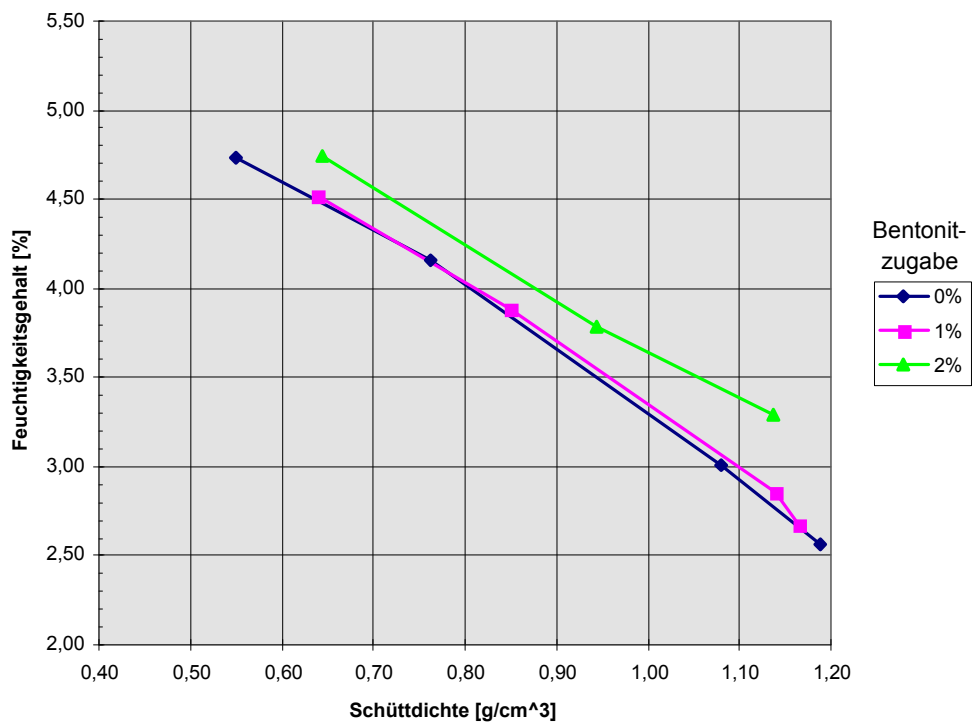


Abb. 77 : Zusammenhang zwischen Formstoff-Feuchte und Schüttdichte

### 4.3.3 Betriebsformstoff Woeste

Die Analysen der Formstoffprobe ergaben einen Aktivbentonitgehalt von 8,9 % (bestimmt nach der Methylenblaumethode) und einen Schlammstoffgehalt von 10,2 %

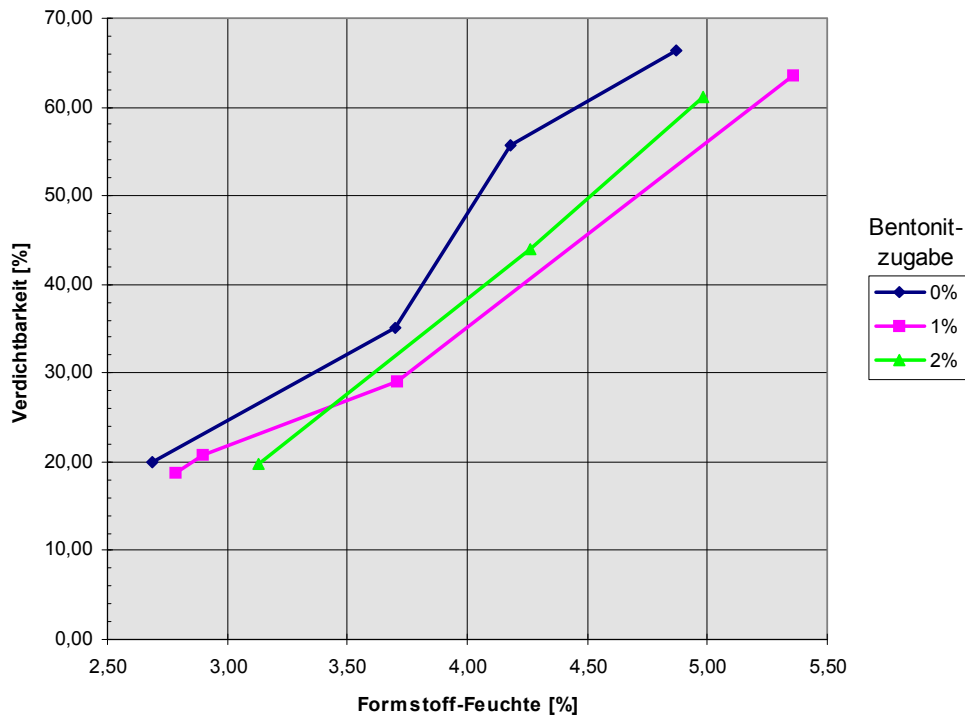


Abb. 78 : Darstellung der Verdichtbarkeit über der Formstoff-Feuchte

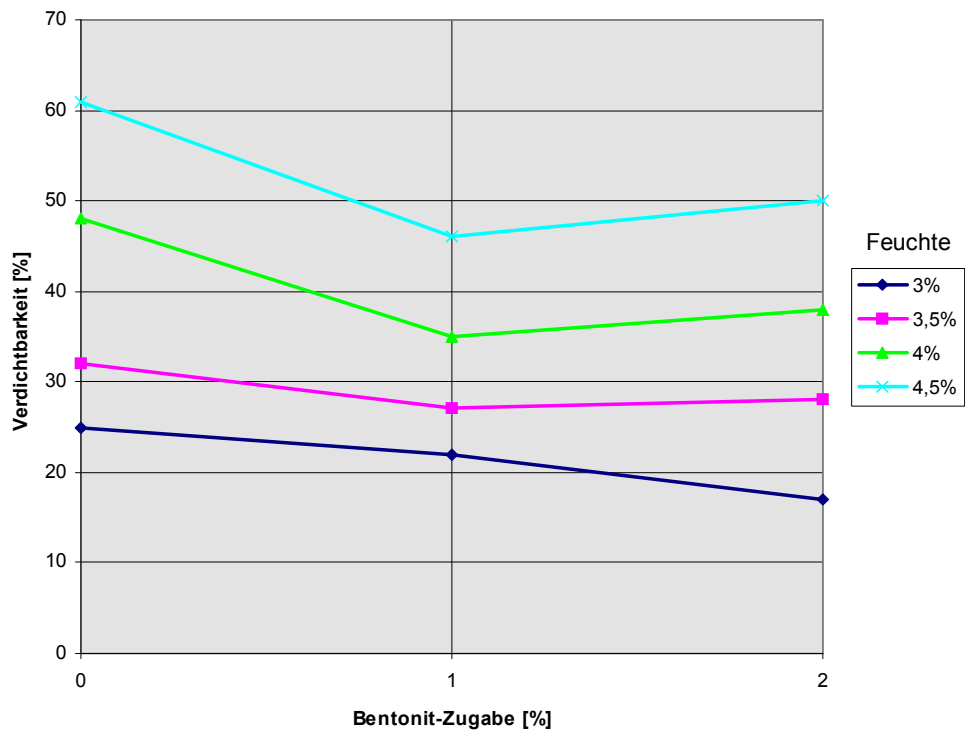


Abb. 79 : Darstellung der Verdichtbarkeit über der Bentonitzugabe, für verschiedene Formstoff-Feuchten

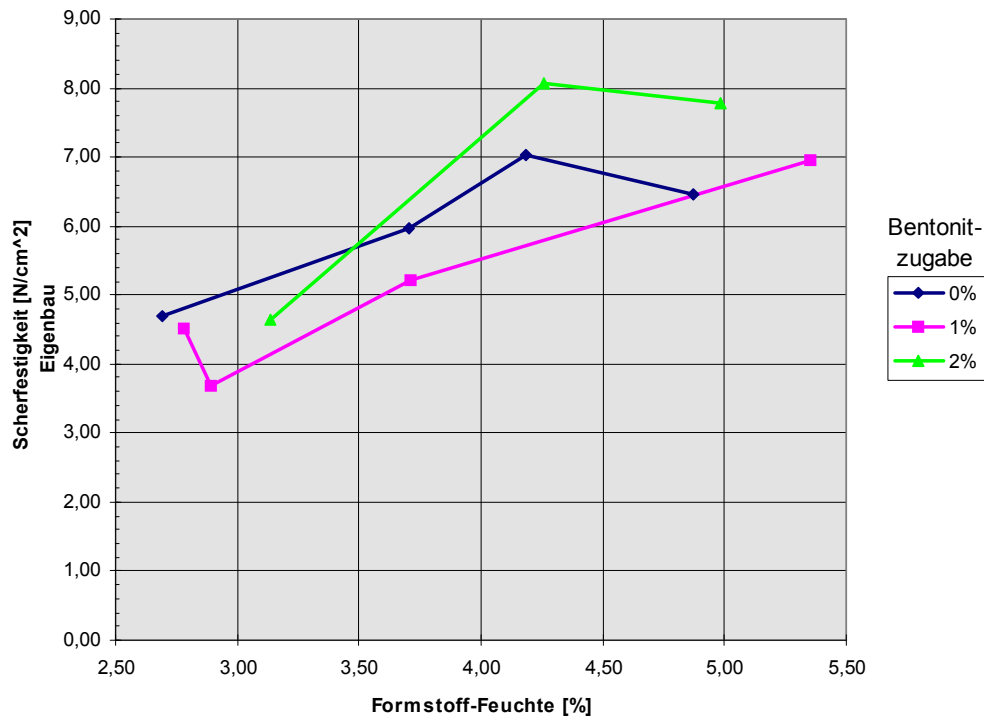


Abb. 80 : Scherfestigkeit für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben, gemessen mit dem Eigenbau-Formstoffprüfgerät

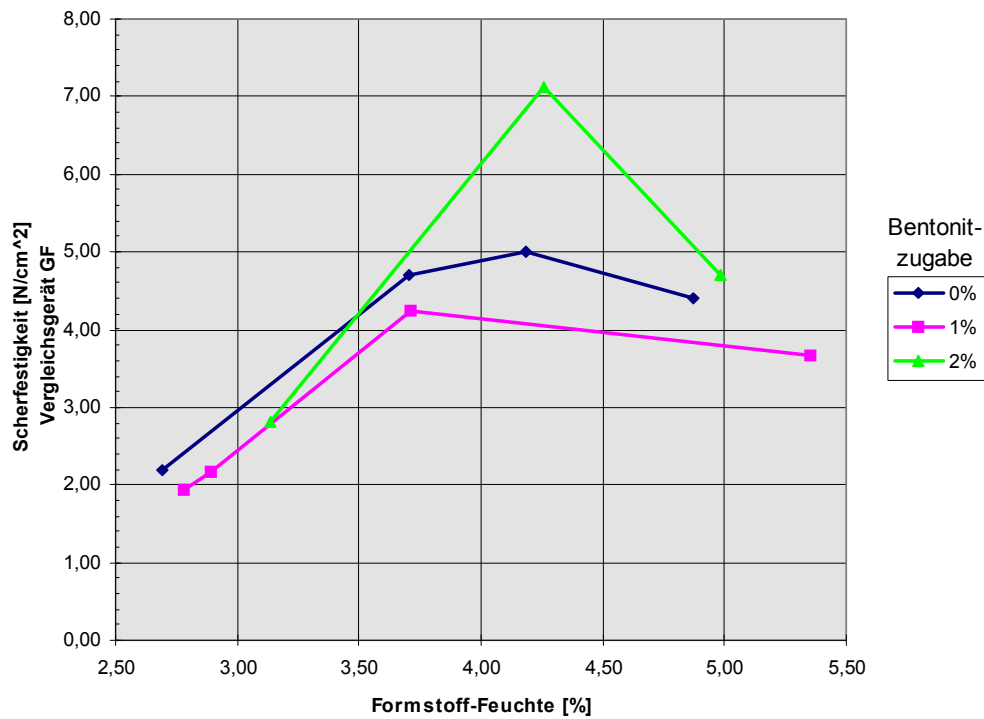


Abb. 81 : Scherfestigkeit für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben, gemessen mit dem Labor-Vergleichsgerät

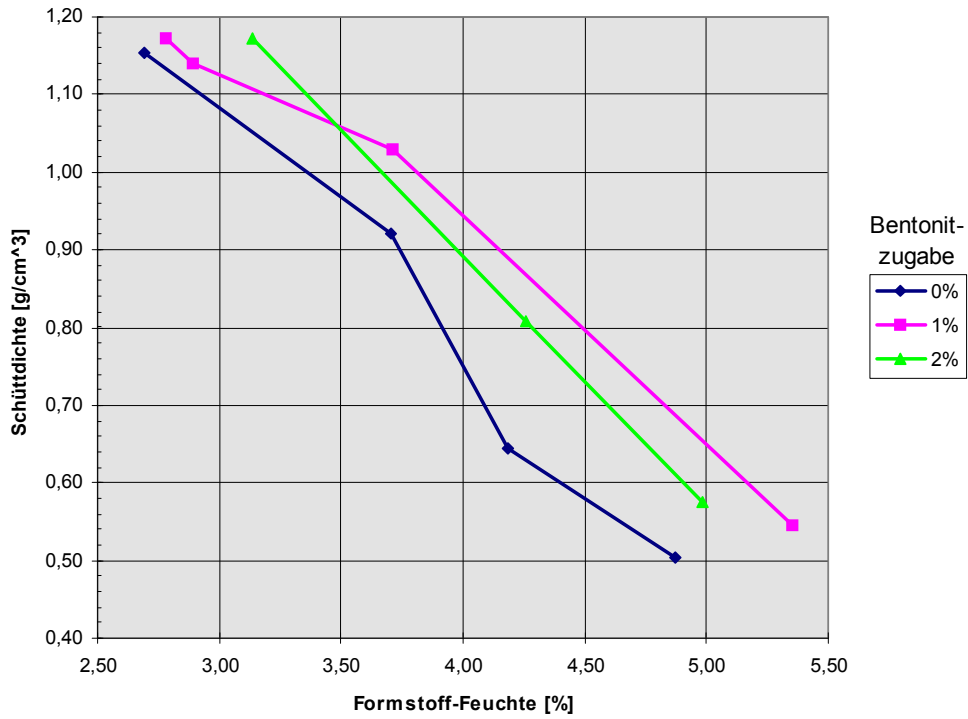


Abb. 82 : Schüttdichte für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben

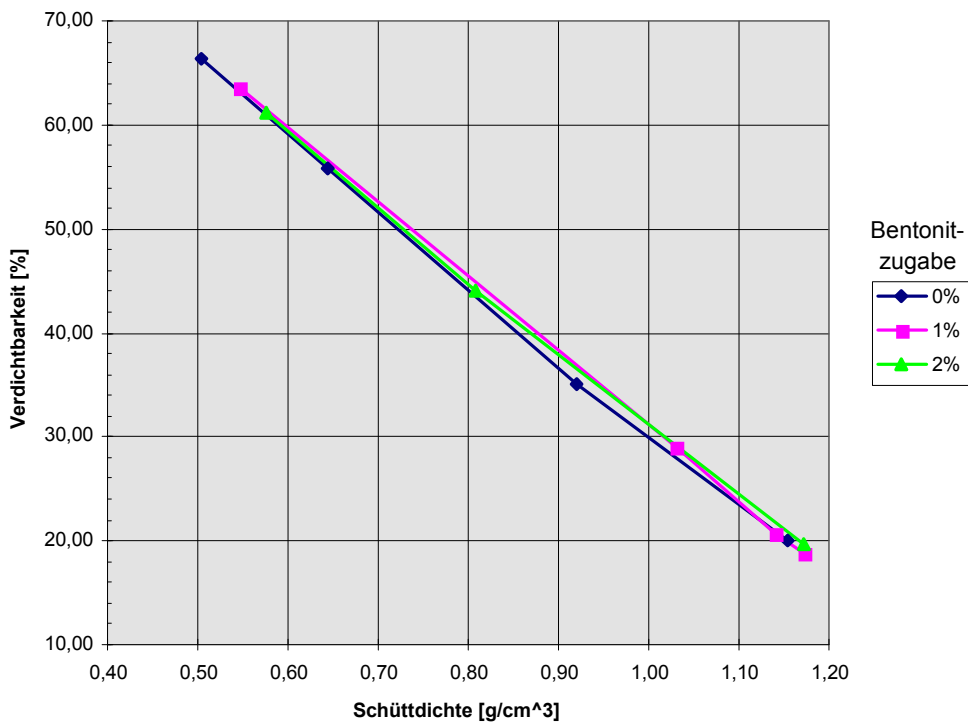


Abb. 83 : Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Schüttdichte



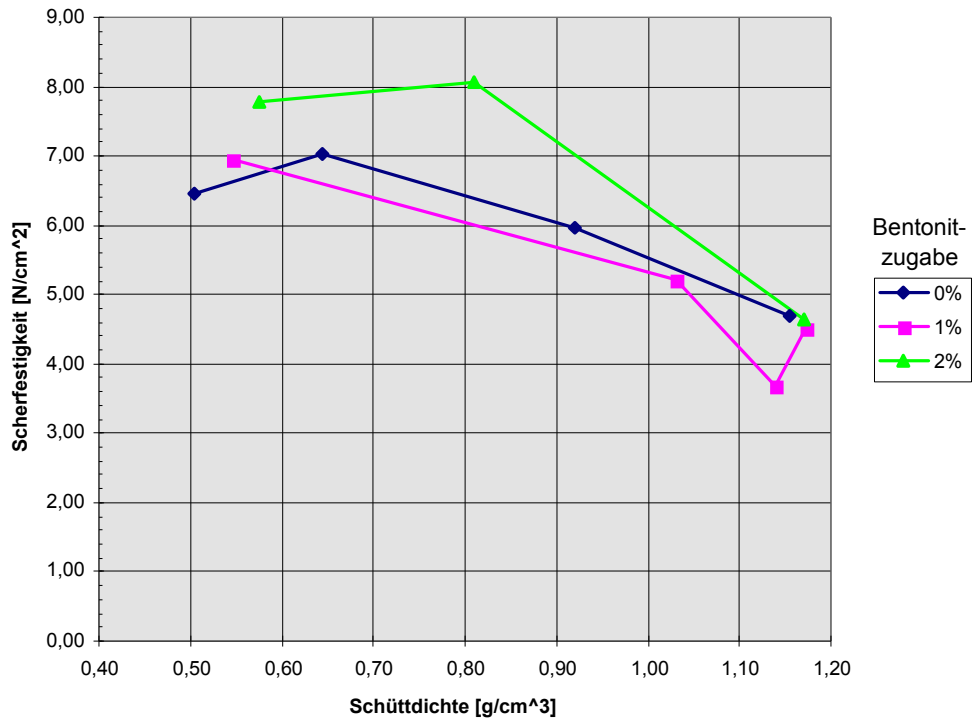


Abb. 84 : Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit und Schüttdichte

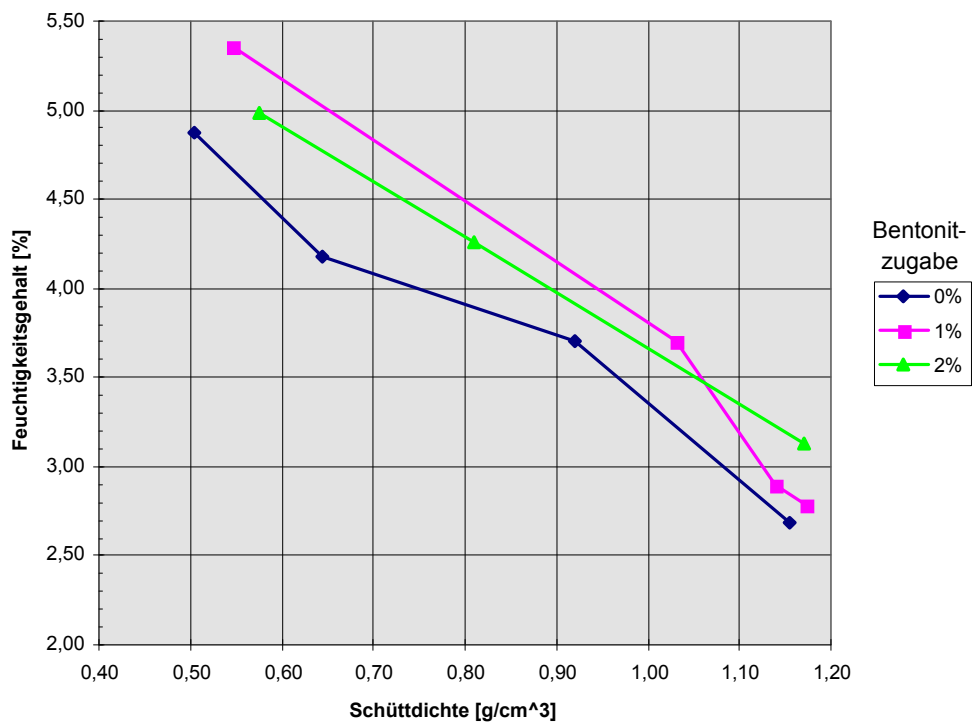


Abb. 85 : Zusammenhang zwischen Formstoff-Feuchte und Schüttdichte

Alle betrachteten Betriebsformstoffe zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen Formstoff-Feuchte und Verdichtbarkeit (Abb. 62; Abb. 70; Abb. 78). Der Einfluss der Bentonitzugaben auf die Verdichtbarkeit ist nicht so ausgeprägt. Gegenüber den Verdichtbarkeitskurven des Betriebsformstoffs (Kurven 0% Bentonitzugabe) wird bei weiterer Bentonitzugabe zum Erreichen einer bestimmten Verdichtbarkeit eine höhere Formstoff-Feuchte benötigt. Dieser Effekt kehrt sich allerdings bei weiterer Bentonitzugabe wieder um, wie zumindest bei den Betriebsformstoffen von AE Goetze und Woeste deutlich wird.

Die gemessenen Scherfestigkeiten, sowohl gemessen mit dem Verdichtbarkeitsprüfgerät (Abb. 64; Abb. 72; Abb. 80) als auch mit dem Labor-Vergleichsgerät (Abb. 65; Abb. 73; Abb. 81), zeigen den Abfall der Festigkeiten bei hohen Formstoff-Feuchten. Bei steigenden Bentonitkonzentrationen steigen die erreichten Scherfestigkeiten an, allerdings bei erhöhtem Wasserbedarf.

Wie schon bei den Versuchen mit Labor-Prüfmischungen ist der Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Schüttdichte im betrachteten Feuchte- bzw. Verdichtbarkeitsbereich praktisch linear und für die betrachteten Formstoffe identisch (Abb. 67; Abb. 75; Abb. 83). Die Messung der Schüttdichte liefert also gegenüber der Messung der Verdichtbarkeit keine weiteren Aussagen.

## 4.4 Praxisversuche

### 4.4.1 Versuche in der Fa. Georg Fischer, Mettmann

Nach Abschluss der Vorversuche wurden Praxisversuche in den Gießereien *Georg Fischer, Mettmann*, und *Woeste, Velbert* durchgeführt. In der Gießerei *Georg Fischer* erlaubt die vorhandene Anlagensteuerung eine weitgehende Dokumentation der Prozessparameter. Unter anderem ist dort ein weiteres Verdichtbarkeitsmessgerät fest installiert, das die Qualität des Formstoffs hinter dem Mischer überwacht. Das neuentwickelte Verdichtbarkeitsmessgerät wurde vor dem Mischer installiert, und im Rahmen dieser Versuche manuell mit Formstoff versorgt (Abb. 86).

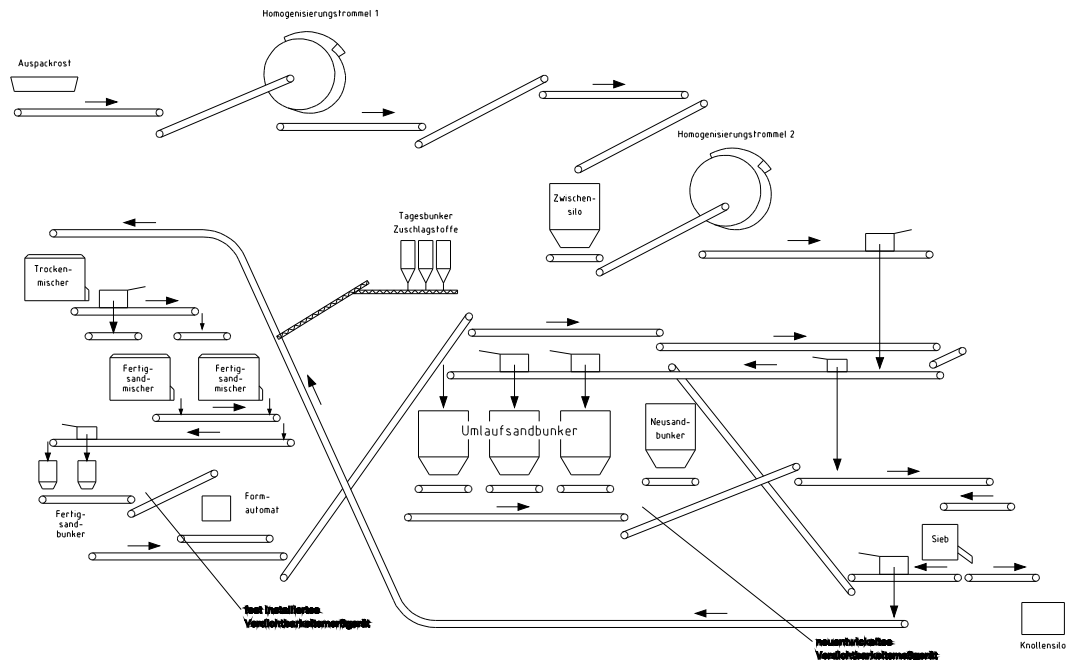


Abb. 86 : Messpositionen während der Praxisversuche

Während der Versuche wurden kontinuierlich Formstoffproben entnommen und dem Verdichtbarkeitsprüfgerät zugeführt. Bedingt durch die Zykluszeit des Gerätes konnten dabei Messzyklen von ca. 80 Sekunden eingehalten werden. Die Temperatur des Formstoffs wurde manuell erfasst und dokumentiert.

Nach Abschluss der Versuche wurden die gespeicherten Prozessdaten der Anlagensteuerung ausgelesen und den Messergebnissen gegenübergestellt. Anhand der Vorversuche und der Messergebnisse wurde ein Fuzzy-Regelschema aufgestellt, und in einer Simulation dann die Regelantwort, d. h. die errechnete Wasserzugabe, der Wasserzugabe des realen Prozesses gegenübergestellt.

Es wurden insgesamt an 10 Tagen Versuche durchgeführt. Die entsprechenden Wertetabellen von vier aufeinanderfolgenden Versuchstagen befinden sich im Anhang. Dabei werden in den linken Spalten die Daten des Verdichtbarkeitsmessgerätes, die berechneten Wasserzugabemengen und die Wasserzugaben der vorhandenen Steuerung dargestellt, und in den rechten Spalten die Aufzeichnungen der regelmäßigen Formstoffprüfungen des Sandlabors GF.

In einem ersten Schritt wurde die gemessene Altsand-Verdichtbarkeit der Wasserzugabe gegenübergestellt (Abb. 87). Die Wasserzugabe wurde anhand der Einschaltdauer der entsprechenden Ventile berechnet, da die Messbereiche der installierten Wasseruhren für diesen Zweck nicht brauchbar waren. Somit werden einige Einflüsse, z. B. ein eventuell schwankender Versorgungsdruck im Wassernetz, nicht berücksichtigt.

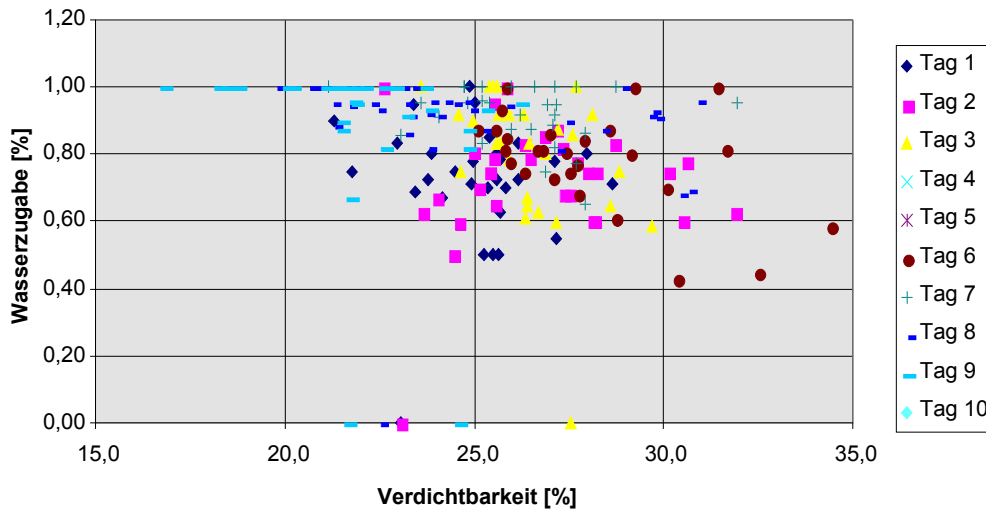


Abb. 87 : Vergleich der einzelnen Versuchstage

Bei konstanten Formstoffkennwerten sollte sich ein direkter Zusammenhang zwischen der Altsandverdichtbarkeit und der Wasserzugabe ergeben. Dies ist aber nicht zu erkennen, stattdessen wurden Wasserzugaben zwischen 0,4% und 1% ermittelt, praktisch unabhängig von der gemessenen Altsand-Verdichtbarkeit. Da zu vermuten war, dass neben den anlagenbedingten Ungenauigkeiten, insbesondere in der Bestimmung der Wasserzugabe, weitere Einflussgrößen eine Rolle spielen, erfolgten weitere Auswertungen. In den folgenden Diagrammen ist wieder die gemessene Verdichtbarkeit der Wasserzugabe gegenübergestellt, wobei die Farben bzw. Symbole Wertebereichen der weiteren Einflussgrößen entsprechen.

Mögliche weitere Einflussgrößen sind z. B. die Formstofftemperatur (Abb. 88), Auspacktemperatur (Abb. 89) oder die aktuelle Zufuhr von Zuschlagstoffen (Abb. 90).

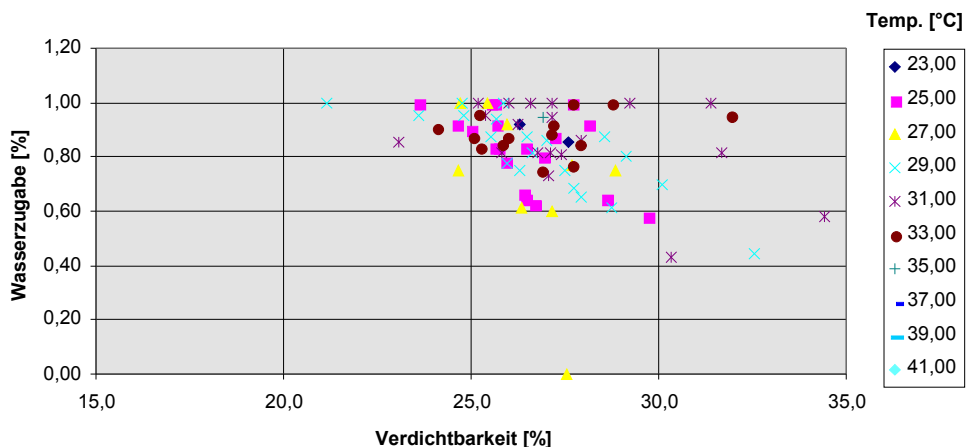


Abb. 88 : Abhängigkeit von der Formstofftemperatur

Die Formstofftemperatur wurde dabei an der Probenahmestelle des neuentwickelten Verdichtbarkeitsmessgerätes erfasst.

Die Anlagensteuerung der Formsandaufbereitung misst die Formstofftemperatur auf einem Förderband direkt hinter der Auspackstelle, um die notwendigen Wasserzugaben zur ersten Kühlung des Formstoffs zu bestimmen. Die Temperatur des Formstoffs an dieser Stelle ist ein Maß für das Formstoff-Guss-Verhältnis bzw. für die Wärmeenergie, die in den Formstoff übergegangen ist. Eine Abhängigkeit ist im entsprechenden Diagramm (Abb. 89) nicht zu erkennen, unter anderem da durch die Formstoffbunker

zwischen Auspackstelle und der Probenahmestelle eine Vermischung und damit Vergleichmäßigung unterschiedlicher Formstoffzustände erfolgt.

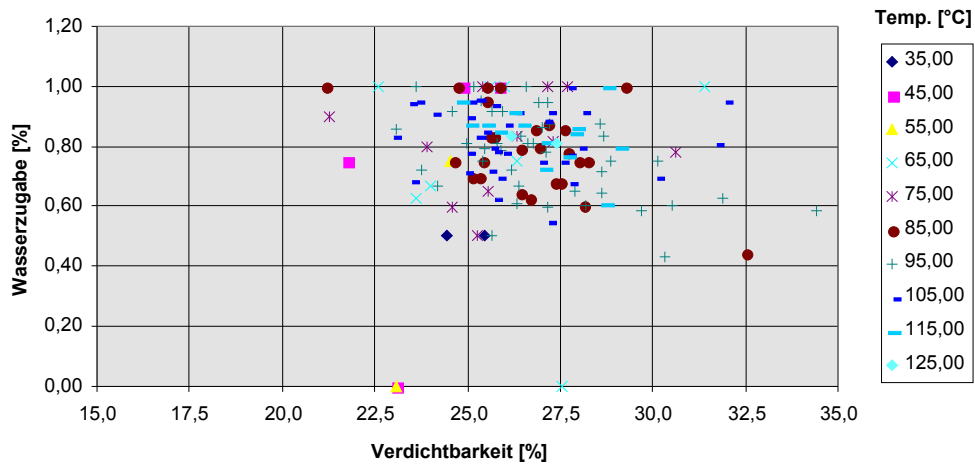


Abb. 89 : Abhängigkeit von der Temperatur des Formstoffs an der Auspackstelle

Die Bentonitzugabe erfolgt bei der Fa. *Georg Fischer* durch volumetrische Dosierung über eine Zellradschleuse. Die Zugabemenge wird in % der maximal möglichen Zugabemenge eingestellt.

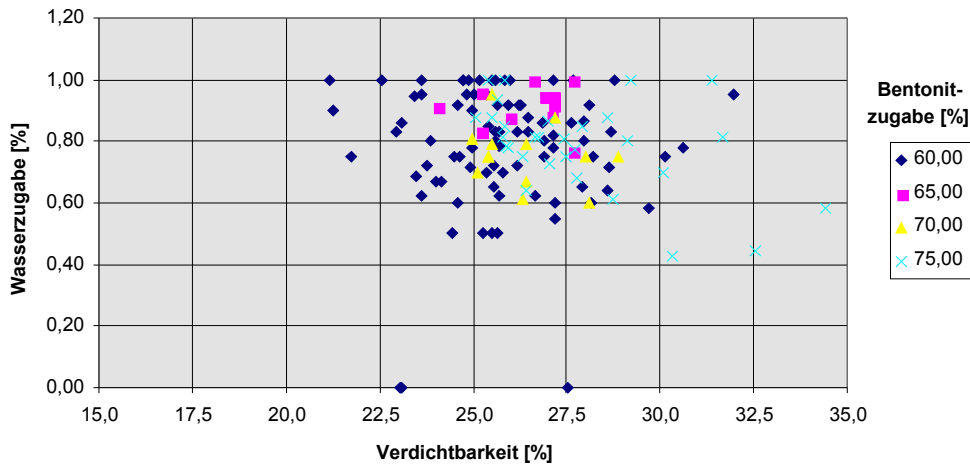


Abb. 90 : Abhängigkeit von der Bentonitzugabe (Zellradschleuse %)

Man erkennt, dass die meisten Messungen bei einer Bentonitzugabe (Einstellung der Zellradschleuse) von 60% erfolgten. Zu den Zeiten, bei denen die Zellradschleuse auf 65% eingestellt war, war die Wasserzugabe verhältnismäßig hoch (zwischen 0,8 % und 1 %), und bei einer Einstellung von 70 % meist niedriger, zwischen 0,6 % und 0,8 %. Ein entsprechender Zusammenhang ist aber für die anderen Messwerte nicht zu erkennen. Es ist daher zu vermuten, dass diese Unterschiede eher von der Kombination der beschriebenen Einflussgrößen hervorgerufen werden.

Das folgende Diagramm (Abb. 91) zeigt die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Verdichtbarkeiten im Altsand und Formstoff. Dabei sind alle gemessenen Daten über 5 Versuchstagen zusammengefasst.

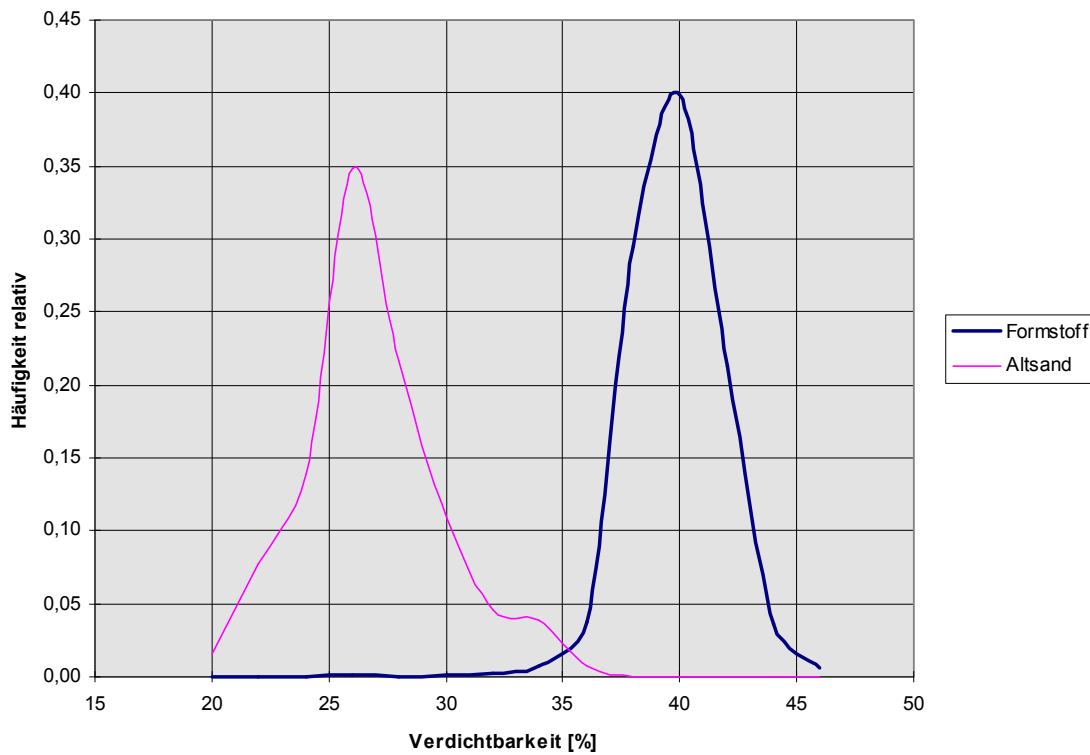


Abb. 91 : Häufigkeitsverteilung der Verdichtbarkeiten im Altsand und im Fertigsand

Die Schwankungsbreite der Formstoff-Verdichtbarkeit vor und nach dem Mischer, also im Altsand und im fertig aufbereiteten Formstoff, sind nahezu gleich. In der Sandaufbereitung der Fa. *Georg Fischer* wird der Altsand recht früh heruntergekühlt und angefeuchtet, wobei durch eine ausgeklügelte Bunkerstrategie und dem Einsatz von Homogenisierungstrommeln ein weitgehender Ausgleich der Formstoffschwankungen schon im Vorfeld erfolgt. Die Regelung der Wasserzugabe an den Fertigsandmischern dient nur noch zum Feinausgleich.

Anhand der aufgenommenen Daten wurde ein Fuzzy-Regler erstellt, der anhand der Verdichtbarkeit des Altsandes und seiner Temperatur die notwendige Wasserzugabemenge ermittelt. Dazu wurden für die Verdichtbarkeit des Altsandes die linguistischen Terme *zu\_klein*, *klein*, *optimal*, *groß*, *zu\_groß* definiert, mit den Wertebereichen in Abb. 92 :

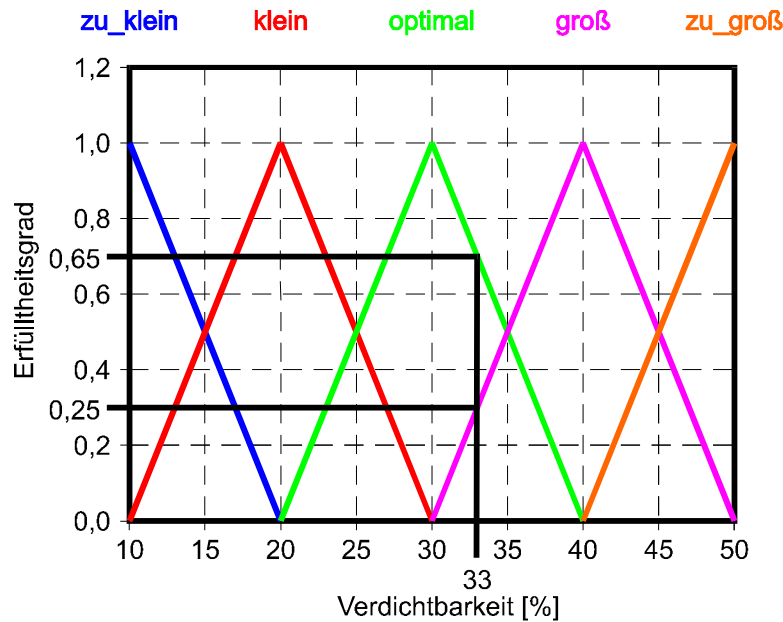


Abb. 92 : Fuzzifizierung der Verdichtbarkeit

So wird zum Beispiel der Verdichtbarkeit 33%, einem scharfen Wert, wie er von dem Formstoffprüfgerät ermittelt wurde, die Eigenschaft *optimal* mit einem Erfülltheitsgrad von 0,65 und die Eigenschaft *groß* mit einem Erfülltheitsgrad von 0,25 zugeordnet.

Entsprechend wurden für die Formstofftemperatur die linguistischen Terme *niedrig* und *hoch* festgelegt, mit den Wertebereichen in Abb. 93. Einer Temperatur von 45 °C wird damit der Term *niedrig* mit einer Erfülltheit von 0,25 und der Term *hoch* mit einer Erfülltheit von 0,75 zugeordnet.

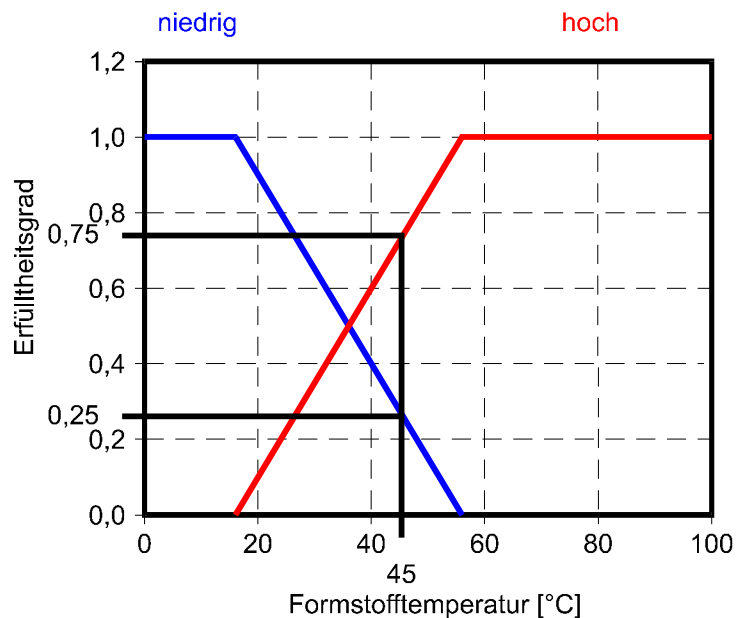


Abb. 93 : Fuzzifizierung der Formstofftemperatur

Die Regelgröße Wasserzugabemenge wird ebenfalls über linguistische Terme beschrieben, durch *wenig*, *mehr*, *viel* mit den Wertebereichen in Abb. 94. Dabei wurde dem Term *wenig* die Wasserdosiermenge 0 %, *mehr* die Dosiermenge 0,4 % und *viel* der Dosiermenge 0,8% zugeordnet.

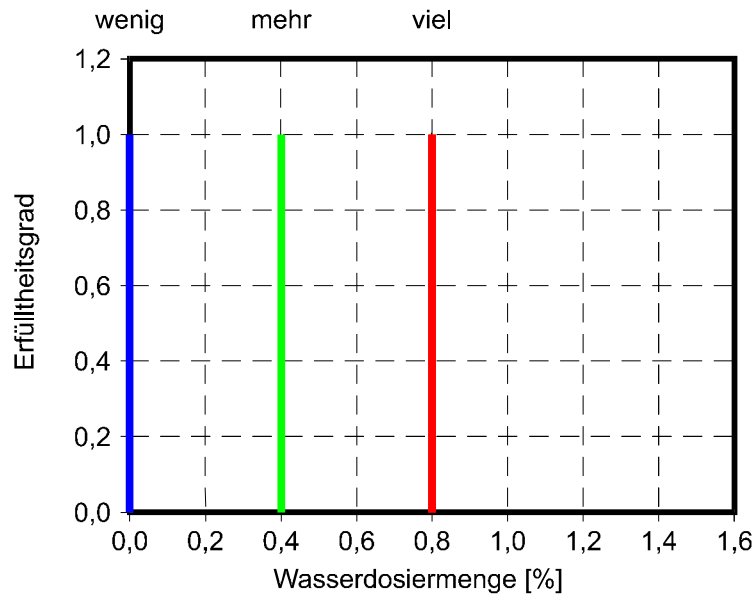


Abb. 94 : Fuzzifizierung der Wasserzugabemenge

Der Fuzzy-Regler wird nun durch eine Tabelle von Regeln beschrieben, die die Wasserzugabe in Abhängigkeit von Verdichtbarkeit und Temperatur beschreiben (Tab. 8).

Regel	Verdichtbarkeit	Temperatur	Wasserzugabe
1	zu_klein	niedrig	viel
2	klein	niedrig	mehr
3	optimal	niedrig	wenig
4	groß	niedrig	wenig
5	zu_groß	niedrig	wenig
6	zu_klein	hoch	viel
7	klein	hoch	viel
8	optimal	hoch	mehr
9	groß	hoch	wenig
10	zu_groß	hoch	wenig

Tab. 8 : Regelbasis des Fuzzy-Reglers

Im betrachteten Beispiel sind also die Regeln 3, 4, 8 und 9 aktiv, d. h. sie haben Erfülltheitsgrade größer 0. Der Erfülltheitsgrad jeder Regel berechnet sich als Produkt der Erfülltheitsgrade der einzelnen Terme.

Regel	Verdichtbarkeit		Temperatur		Wasserzugabe	
	Term	Erfülltheitsgrad	Term	Erfülltheitsgrad	Term	Erfülltheitsgrad
3	optimal	0,65	niedrig	0,25	wenig	0,1625
4	groß	0,25	niedrig	0,25	wenig	0,0625
8	optimal	0,65	hoch	0,75	mehr	0,4875
9	groß	0,25	hoch	0,75	wenig	0,1875

Tab. 9 : Erfüllte Regeln für die Beispieldaten



Bei der Defuzzifizierung werden nun die Erfülltheitsgrade der Regeln für die Terme der Wasserzugabe addiert. Dies ergibt für Wasserzugabe *wenig* einen Erfülltheitsgrad von 0,4124 und für Wasserzugabe *mehr* einen Erfülltheitsgrad von 0,4875. Um wieder einen scharfen Wert für die Wasserzugabe zu erhalten, wird nun ein gewichteter Mittelwert der entsprechenden Wassermengen gebildet (Gl. 1).

$$\text{Wasserzugabe} = \frac{0 * 0,4124 + 0,4 * 0,4875}{0,4124 + 0,4875} = 0,217 \quad \text{Gl. 1}$$

Im Beispiel ergibt sich eine Wasserzugabe von 0,22 %.

Mit den gewählten Fuzzyfizierungen der Eingangsgrößen als überlappende Terme ergibt sich eine stetige Regelkennlinie, die als Ebene im dreidimensionalen Raum dargestellt werden kann (Abb. 95) :

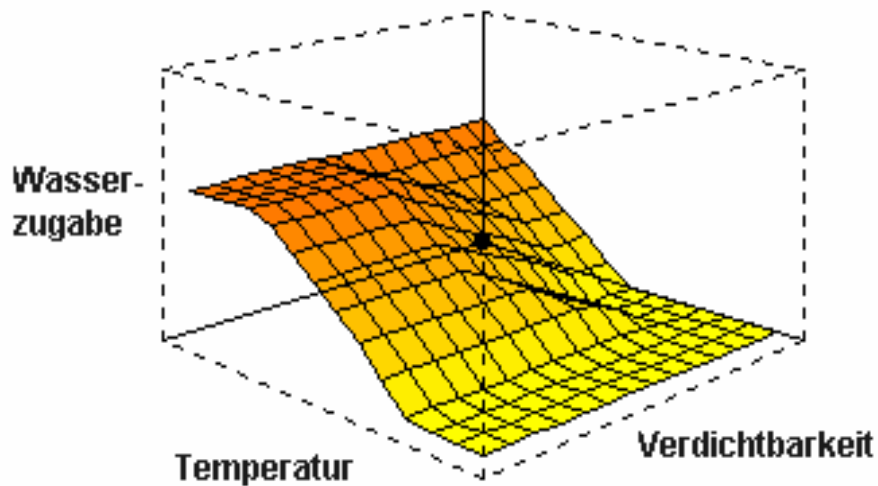


Abb. 95 : Kennlinienfeld des Fuzzy-Reglers

Der so definierte Regler wurde nun benutzt, um aus den gespeicherten Verdichtbarkeits- und Temperaturmesswerten die Wasserzugabe zu berechnen. Diese Wasserzugabe (H<sub>2</sub>O Fuzzy) wurde dann der realen Wasserzugabe (H<sub>2</sub>O Ist) und der Wasserzugabe berechnet aus den ermittelten Formstoffkennwerten des neuen Formstoffprüfgerätes (H<sub>2</sub>O Soll) gegenübergestellt (Abb. 96).

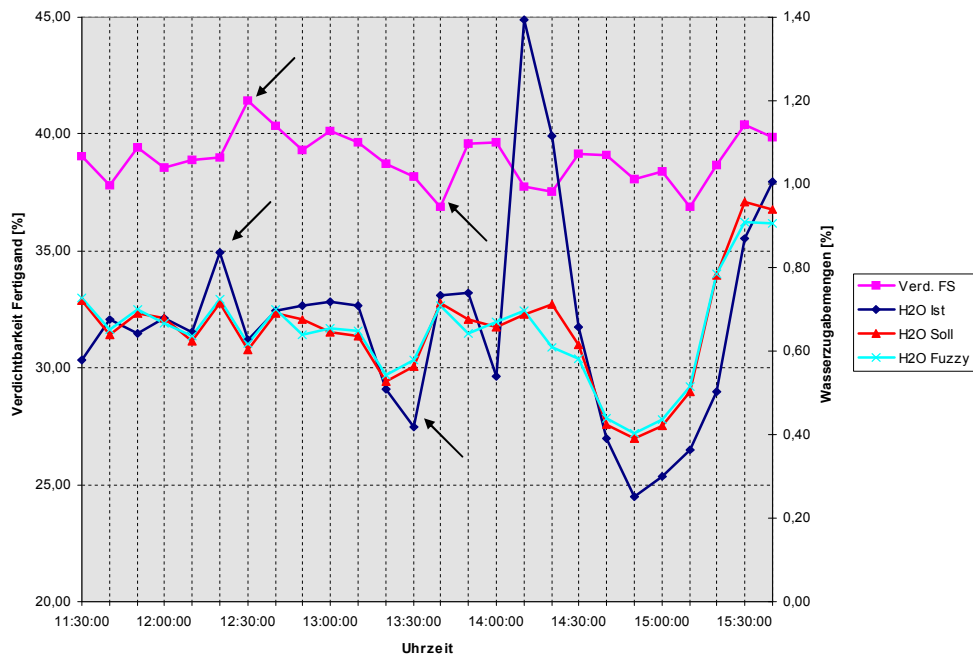


Abb. 96 : Vergleich des Fuzzy-Reglers mit einer konventionellen Regelung

Man kann erkennen, dass der Fuzzy-Regler (H<sub>2</sub>O Fuzzy) der real vorhandenen Regelung (H<sub>2</sub>O Ist) recht genau folgt. Bei den größeren Abweichungen im Diagramm um 12:20 und 13:20 sieht man, dass die Verdichtbarkeit des Fertigformstoffs (Verd. FS) die Schwankungen widerspiegelt. Dies ist ein Zeichen dafür, dass die vorhandene Regelung eine Schwankung des Formstoffzustands nicht ausregeln konnte.

#### 4.4.2 Versuche in der Fa. Woeste, Velbert

Im Anschluss wurden weitere Versuche in der Gießerei *Woeste, Velbert* durchgeführt. Dort wurde das Verdichtbarkeitsmessgerät auf der Mischerbühne installiert, wobei die Probenahme direkt aus dem Mischer erfolgte. Die Mischersteuerung wurde dazu so verändert, dass nach der Füllung des Mixers mit Altsand, Neusand und Bentonit zur Homogenisierung der Komponenten eine Vormischzeit von 10 Sekunden eingefügt wurde. Am Ende dieser Vormischzeit erfolgte dann die manuelle Probenahme. Jeder Charge wurde außerdem eine Fertigsandprobe auf dem Abzugsband hinter dem Mischer entnommen und auch dem Verdichtbarkeitsmessgerät zugeführt, so dass mit diesem einen Gerät sowohl die Altsand- als auch die Fertigformstoff-Daten ermittelt werden konnten. Das Steuerprogramm des Verdichtbarkeitsmessgerätes wurde so erweitert, dass die Öffnungszeiten des Wasserdosierventils erfasst und den einzelnen Chargen zugeordnet werden konnte. Durch Aufschreibung der Zählerstände der vorhandenen Wasseruhr wurde die Zuordnung zwischen Dosierzeit und Dosiermenge überprüft (Abb. 97).

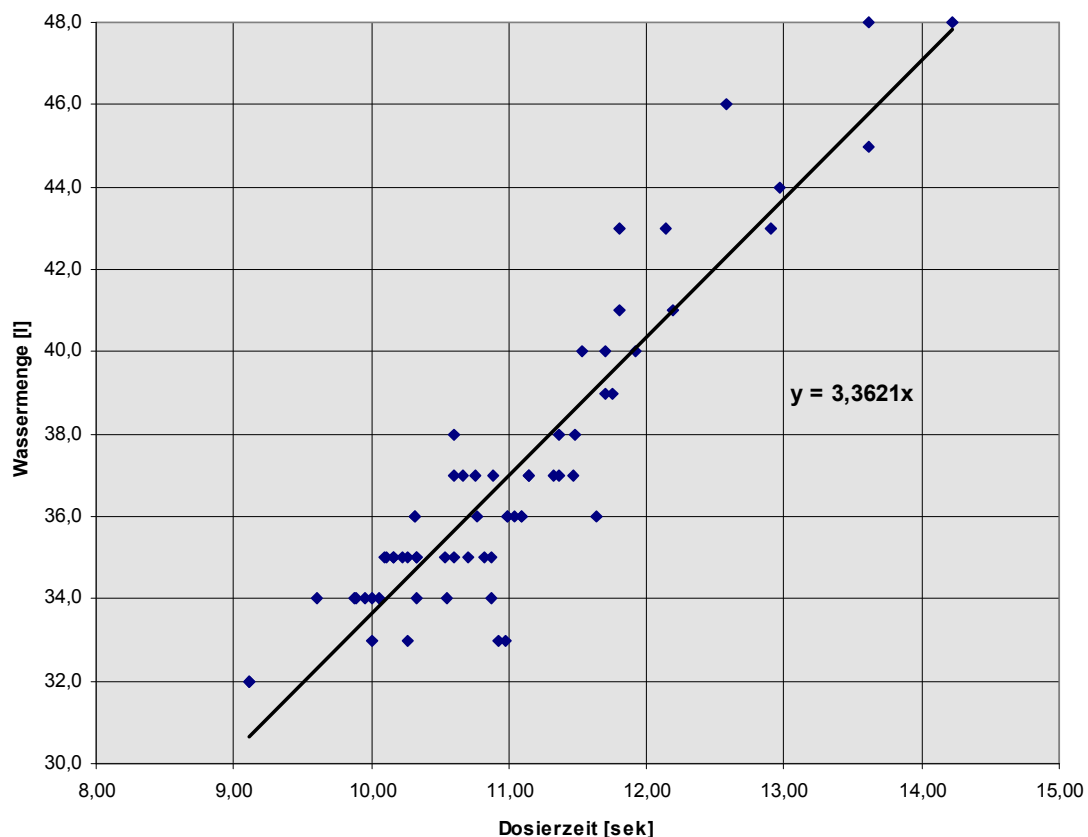


Abb. 97 : Kennlinie Wasserdosierzeit / Wassermenge

Die messtechnische Erfassung der Wasser-Dosierzeit zur Bestimmung der Zugabemenge berücksichtigt keine Störgrößen wie etwa Schwankungen des Wasserdrucks oder auch Schwankungen im Druckluftnetz, die zu Unterschieden in den Ventilöffnungszeiten führen können.

Es wurden an 4 Tagen Versuche durchgeführt. Dabei zeigte sich, ähnlich wie bei den Versuchen bei *Georg Fischer*, dass der Zusammenhang zwischen der gemessenen Altsand-Verdichtbarkeit und der Wasser-Dosiermenge, die durch ein Feuchtemessgerät der Fa. *Lippke* gesteuert wurde, nicht eindeutig durch eine Kennlinie beschrieben werden konnte. Die folgende Darstellung (Abb. 98) zeigt die einzelnen Messwerte sowie Regressionskurven für jeden Tag.

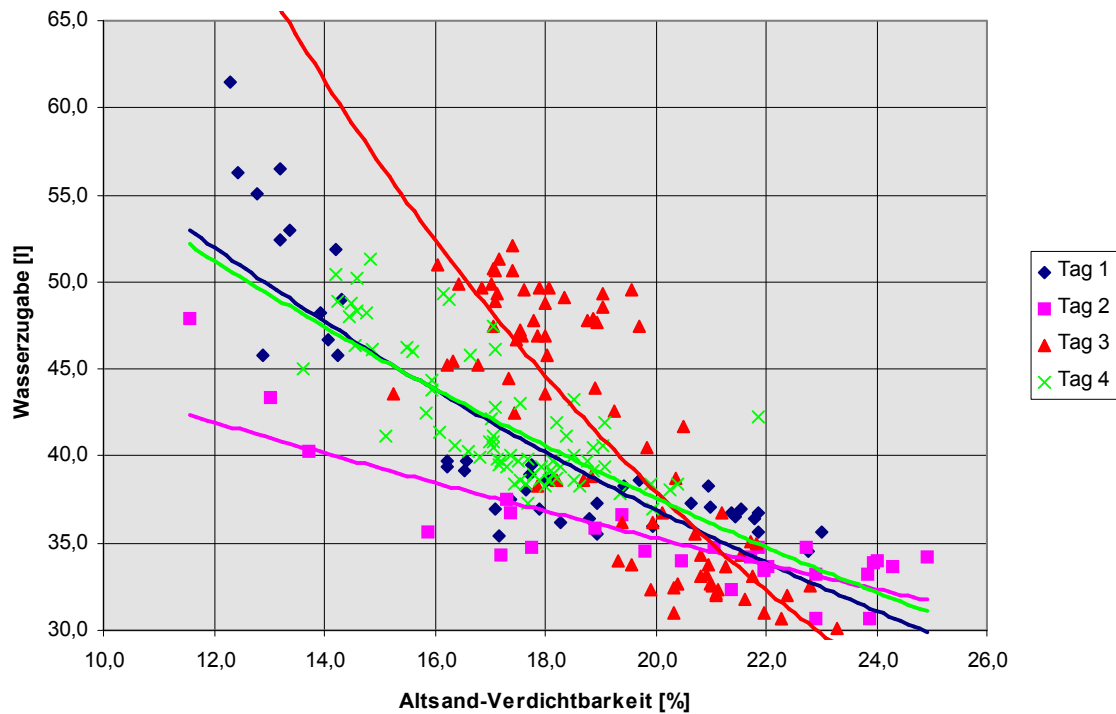


Abb. 98 : Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Wasserzugabe, aufgeschlüsselt nach Versuchstagen

Die Wasserzugabe ist außer von der Altsand-Verdichtbarkeit auch von der Formstofftemperatur abhängig (Abb. 99) Die Formstofftemperatur des Altsandes wurde manuell erfasst. Auch die Dosiersteuerung der Fa. *Lippke* misst die Formstofftemperatur im Altsand-Dosiergefäß und berücksichtigt sie bei der Bestimmung der Wasserzugabe.

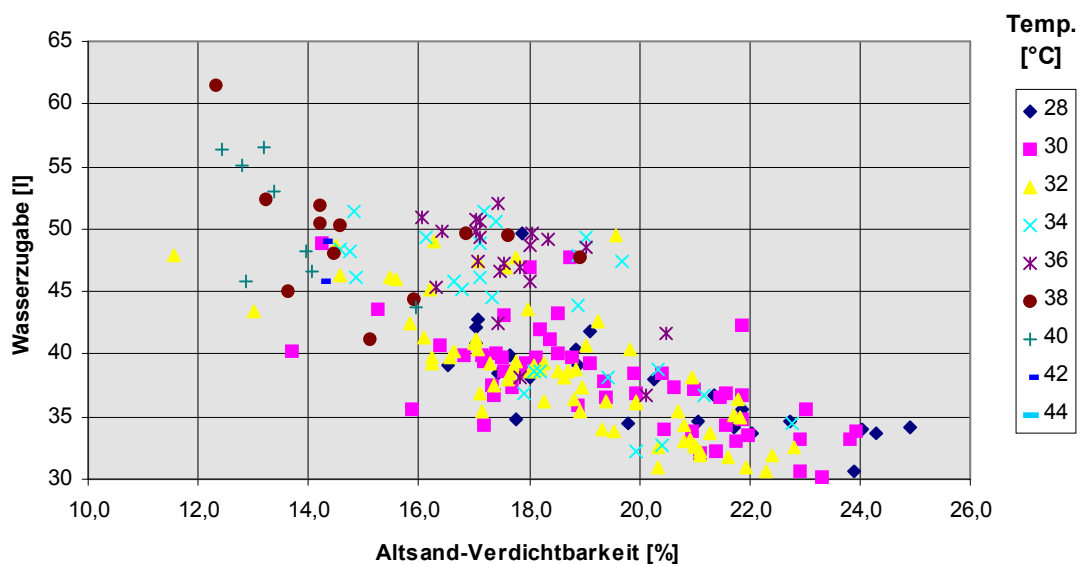


Abb. 99 : Altsand-Verdichtbarkeit und Wasserzugabe bei verschiedenen Formstofftemperaturen

Man erkennt, dass bei höheren Temperaturen die Wasserzugabe im allgemeinen höher ist als bei niedrigeren Temperaturen.

Eine Regressionsrechnung des zwischen der Altsand-Verdichtbarkeit und der Wasserzugabe, durchgeführt für jedes 2°C-Intervall der Formstofftemperatur, ergibt die Darstellung in Abb. 100:

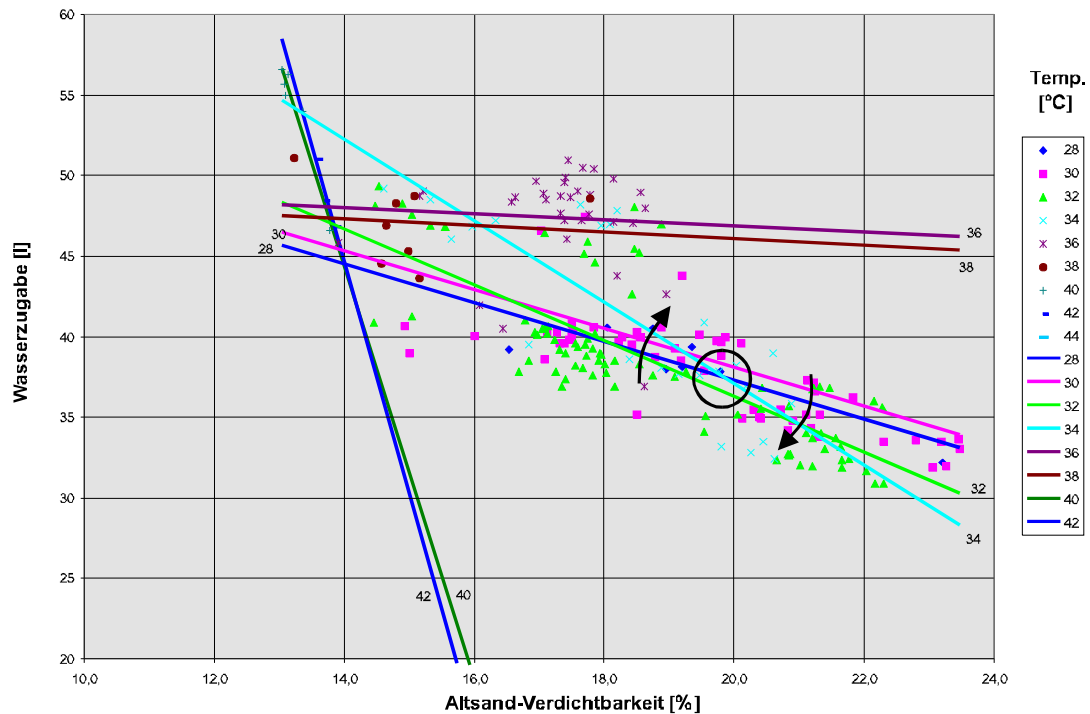


Abb. 100 : Kennlinien Verdichtbarkeit/Wasserzugabe für unterschiedliche Temperaturbereiche

Die Regressionsgeraden für 28°C und 30°C liegen praktisch übereinander, dann wird bei weiter steigender Temperatur der Abfall der Geraden größer, bis bei höheren Temperaturen die Regressionsrechnung wegen der nicht ausreichenden Messwertzahl bzw. der Lage der Messwerte ungenauer wird und schließlich keine Aussage mehr erlaubt. Entsprechend zeigt eine dreidimensionale Darstellung (Abb. 101) zwar den generellen Zusammenhang, es kann aber nicht Ziel sein, dieses Kennlinienfeld im Fuzzy-Regler abzubilden, sondern es soll eine abstrahierte Darstellung gefunden werden, die das Verhalten des Formstoffs beschreibt.

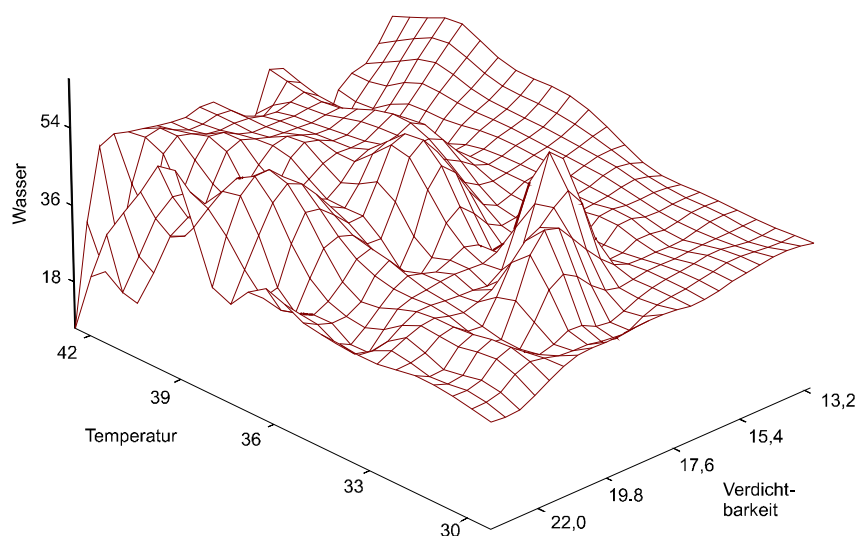


Abb. 101 : Ist-Wasserzugabe für unterschiedliche Altsand-Verdichtbarkeiten und -Feuchten

Die Messung der Ist-Wasserzugabe erfolgte bei diesen Untersuchungen durch eine Erfassung der Dosierzeit. Sie ist daher mit unvermeidlichen Ungenauigkeiten behaftet.

Wie schon aus den Voruntersuchungen bekannt war, schwanken die Formstoffkennwerte der Fa. Woeste sehr stark, so das die vorhandene Feuchteregeleung nicht in der Lage ist, eine konstante Formstoffqualität sicherzustellen. Dies zeigt auch die Aufschlüsselung der Daten nach der erreichten Fertigsand-Verdichtbarkeit (Abb. 102) :

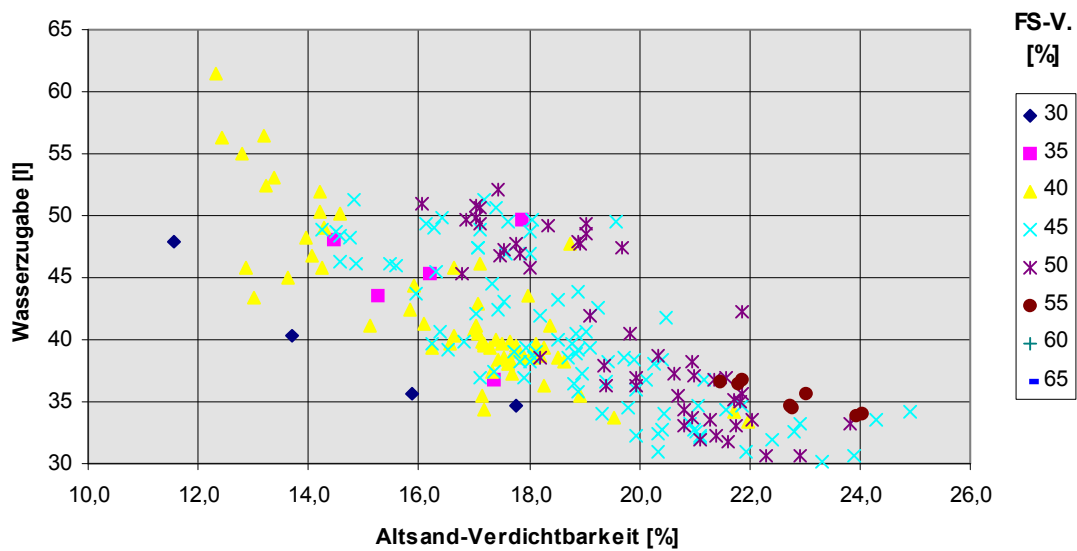


Abb. 102 : Altsand-Verdichtbarkeit und Wasserzugabe, und die resultierenden Fertigsand-Verdichtbarkeiten

Zu erkennen ist, dass bei geringer Wasserzugabe die Fertigsand-Verdichtbarkeit auch unterhalb des Sollwerts von 40 % bleibt, und dass häufig bei hohen Wasserzugaben auch eine zu hohe Fertigsand-Verdichtbarkeit erreicht wird. Deutlich wird auch die große Schwankungsbreite der erreichten Fertigsand-Verdichtbarkeit, zwischen 30 % und 55 %. Dies zeigt, dass die vorhandene Regelung die Formstoffqualität nicht konstant halten kann, und somit als Referenz für das hier entwickelte Regelkonzept nicht dienen kann.

## **4.5 Einführung des Steuerungskonzeptes bei der Fa. Woeste, Velbert**

Von den drei beteiligten Gießereien wurde die Fa. *Woeste* zur Erprobung des Steuerungskonzeptes ausgewählt. Gründe dafür sind :

Bei der Fa. *Georg Fischer* wird ein Großteil der Wasserdosierung als Vorbefeuchtung im Rahmen der Altsandkühlung und Homogenisierung zugegeben. Die Regelung der Wasserzugabe am Mischer muss nur kleine Restschwankungen der Altsandfeuchte ausgleichen, was eine Beurteilung der Regelung erschwert. Da die Mischer kontinuierlich arbeiten, ist bei der Probennahme, Bestimmung der Verdichtbarkeit und Berechnung der Zugabemengen keine genaue Zuordnung zu einer Mischercharge möglich. Die Bentonit- und Glanzkohlenstoffbildnerzugaben erfolgen über eine vorbeugende Formstoffsteuerung, die seit mehreren Jahren im Einsatz ist und sicher kaum verbessert werden kann.

Die Fa. *Goetze* verwendet drei Mischer zur Herstellung des Formstoffs, die getrennte Altsand- und Dosierbunker besitzen, deren Fertigsand aber auf dasselbe Fertigsandband fällt und nicht getrennt zu den Formanlagen geführt werden kann. Die Nutzung der neuen Steuerung bei nur einem Mischer hätte also keine getrennte Beurteilung und Optimierung der Regelung erlaubt. Bedingt durch das sehr gleichmäßige Produktspektrum (Kolbenringe verschiedener Größen) auf der betrachteten Formanlage treten keine großen Schwankungen im Formstoff auf.

Bei der Fa. *Woeste* arbeitet der Mischer dagegen im Chargenbetrieb. Die automatische Entnahme der Formstoffproben aus dem Mischer ist problemlos möglich, ebenso wie der Eingriff in die vorhandene Steuerung zur Wasserzugabe. Als Kundengießerei treten große Schwankungen der Formstoffparameter auf, die durch Unzulänglichkeiten der Sandaufbereitung, wie z. B. nicht ausreichende Formstoffkühlung und zu geringe Bunkerkapazitäten, noch verstärkt werden. Dementsprechend besteht dort ein großer Handlungsbedarf zur Optimierung der Steuerung in der Sandaufbereitung.

### **4.5.1 Einführung der vorbeugenden Formstoffsteuerung**

Vor der Entwicklung und Erprobung dieses neuen Steuerungskonzeptes wurden die Zugabemengen an Bentonit und Glanzkohlenstoffbildnern manuell eingestellt, und zwar als absolute Zugabemengen pro Mischercharge. Die Festlegung dieser Zugabemengen erfolgt anhand der Formstoffanalysen, die zweimal am Tag im Sandlabor durchgeführt werden, sowie von stündlich ermittelten Formstoffkennwerten wie Verdichtbarkeit und Gasdurchlässigkeit.

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten wurde ein Programm zur vorbeugenden Formstoffsteuerung, angepasst an die Gegebenheiten der Fa. *Woeste*, entwickelt und dort eingeführt. Anpassungen wurden insbesondere notwendig durch die gleichzeitige Versorgung zweier Formanlagen durch eine gemeinsame Sandaufbereitung, sowie durch die für Disamatik-Formanlagen möglichen variablen Ballendicken.

Der Fa. *Woeste* lagen die meisten der benötigten Daten nicht vor, bzw. die Genauigkeit und Aktualität der Daten war nicht bekannt. Daher wurden über einen Zeitraum von mehreren Wochen alle produzierten Modellplatten erfasst und eine Datenbank der relevanten Produktionsdaten erstellt. Zur Identifikation der Modellplatten wurde eine Kombination aus Artikelnummer und eine betriebsspezifischen Codenummer benutzt, da keine eindeutige Kennzeichnung der Modellplatten vorhanden war.

Die Fa. *Woeste* setzt auch sogenannte Musterseiten ein, d. H. Modellplatten, die für eine einmalige Benutzung zusammengestellt werden, wobei auf einer Platte eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle angeordnet sein können. Diese Musterseiten machen allerdings nur einen geringen Anteil der Produktion aus. Wahlweise können sie auch in die Modellplattendatei aufgenommen werden, oder die Vielzahl möglicher Musterseiten können in mehrere Gruppen, nach Traubengewicht und Kernintensität, unterteilt und diese Gruppen abgelegt werden.

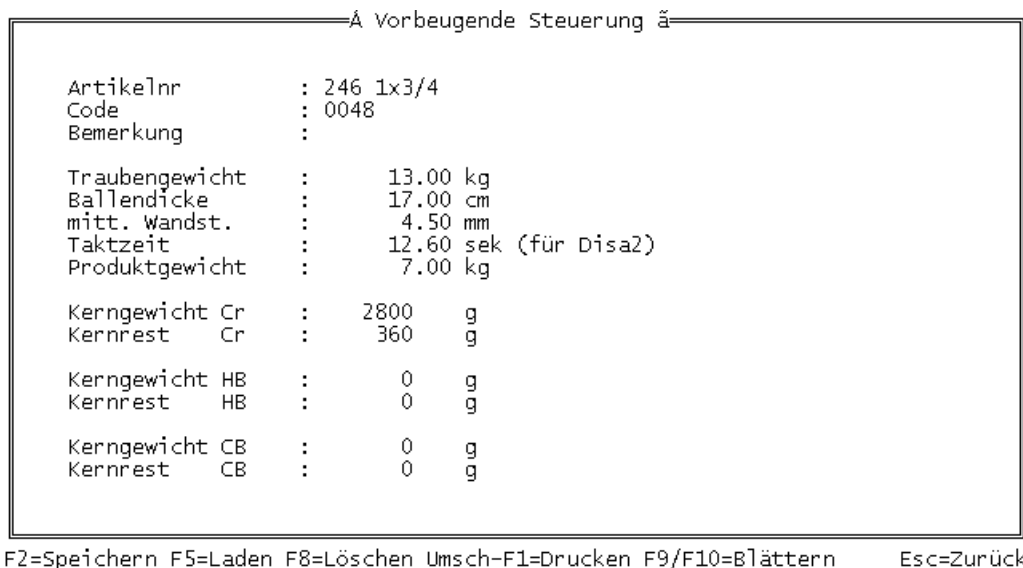


Abb. 103 : Bildschirmsmaske ‚Modellplattendatei‘

In der Modellplattendatei (Abb. 103) werden alle Daten abgelegt, die für die Berechnung des Bentonit- und Glanzkohlenstoffbildnerbedarfs notwendig sind. Insbesondere sind dies :

**Traubengewicht** : Das Traubengewicht kann einfach bestimmt werden, z. B. bei Probeabgüssen, die bei neuen Platten immer durchgeführt werden. Eine komplette Gusstraube mit Anschnitt, Einguss und allen Gussstücken kann am Ende der Gieß- und Abkühlstrecke manuell entnommen werden, bevor sie in die Auspackeinrichtung gelangt, und nach Abkühlung und dem Entfernen anhaftenden Sandes gewogen werden. Diese Entnahme erfolgt bei Probeabgüssen grundsätzlich zur Kontrolle der Gussstücke auf Fehler.

**Ballendicke** : Die Ballendicke ist bei Disamatik-Formanlagen variabel, sie ist abhängig von der Sandmenge, die in die Verdichtungskammer gelangt, und der erreichten Verdichtung des Formstoffs. Auch sie kann bei der Erstellung von Probeabgüssen einfach gemessen werden. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass bei der späteren Produktion die Ballendicke durchaus anders sein kann, wenn dies durch Schwankungen der Formstoffparameter nötig wird, oder durch subjektive Unterschiede in der Einstellung der Formanlagen. Das Computerprogramm zur vorbeugenden Formstoffsteuerung erstellt Produktionspläne, die auch die geplante Ballendicke enthalten und dem Bedienpersonal einen Anhaltspunkt zur Einstellung geben. Bei der Berechnung der Zugabemengen wird davon ausgegangen, dass der Abbrand an Bentonit und Glanzkohlenstoffbildnern nur in der unmittelbaren Nähe der Gussstücke erfolgt und daher ihr Absolutwert unabhängig von der Ballendicke ist. Die Ballendicke beeinflusst aber den Abbrand pro kg Formstoff, und damit auch die notwendigen Zugabemengen pro Mischercharge.

**Mittlere Wandstärke** : Gemeint ist hier die mittlere Wandstärke aller Gussstücke, des Laufsystems und der Speiser. Dies kann natürlich nur eine grobe Schätzung bzw. Mittelung sein. Diese Angabe wird in der installierten Programmversion noch nicht benutzt, da anhand der vorliegenden Produktionsdaten der Einfluss der Wandstärke auf den Abbrand nicht ermittelt werden konnte. Dies kann aber in einer folgenden Programmversion geändert werden.

**Taktzeit** : Die Taktzeit wird benutzt zur Berechnung der Umspannzeitpunkte und damit auch der Zeitpunkte, zu denen eine Änderung der Zugabemengen erfolgen muss. Die beiden vorhandenen Formanlagen verwenden dieselben Modellplattenmaße, so dass die Produktion aller Platten auf beiden Anlagen erfolgen kann. Die beiden Formanlagen unterscheiden sich aber in der möglichen Leistung. In der Datei werden die an der Anlage Disa2 ermittelten Daten gespeichert, bei einer Produktion auf der Anlage Disa3 wird die Taktzeit entsprechend korrigiert.

**Produktgewicht** : Das Gesamtgewicht der auf der Modellplatte befindlichen Gussstücke. Auch diese Angabe wird nicht für die Berechnung der Zugabemengen benötigt, da sich diese auf die Traubengewichte stützt, steht aber in der Datei für weitere Auswertungen zur Verfügung.

**Kerngewichte und Kernreste** : Die Fa. Woeste setzt Croning, Hotbox-, und Coldbox-Kerne ein, je nach geforderter Oberflächenqualität und Festigkeitsanforderungen. Das Kerngewicht kann einfach durch Wiegen der Kerne vor dem Einlegen ermittelt werden. Um den Zulauf von Kernstoff in das



Kreislaufsystem bestimmen zu können, ist auch der Anteil an Kernknollen und im Gussstück verbleibenden Kernteilen zu bestimmen. Diese Anteile, hier als Kernrest bezeichnet, werden entweder im Polygonsieb abgetrennt oder beim Strahlen der Gussstücke entfernt und gelangen nicht in den Formstoffkreislauf. Eine Bestimmung der Gewichte dieser Kernreste erfolgt bei der Entnahme abgossener Ballen durch Sammeln und Wiegen. In der Modellplattendatei werden die Kerne nach dem benutzten Bindersystem getrennt erfasst. Die erste Programmversion verwendet allerdings nur die Summe der Kerngewichte und Kernreste, eine spätere Version könnte die Einflüsse der Binderreste sowie des Zulaufs unterschiedlicher Korngrößen berücksichtigen.

Zur Berechnung benötigt das Programm weitere Angaben, die in einer weiteren Eingabemaske eingegeben werden können

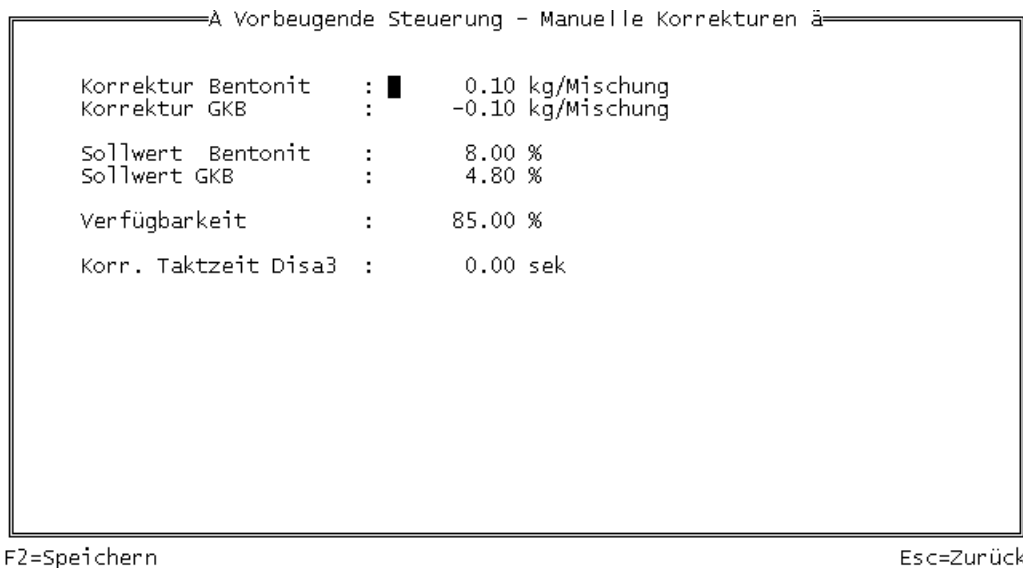


Abb. 104 : Bildschirmmaske ‚Manuelle Korrekturen‘

**Korrektur Bentonit/Glankkohlenstoffbildner** : Ziel der vorbeugenden Formstoffsteuerung ist der Ausgleich von Schwankungen, die durch die unterschiedlichen Produkte in den Formstoffkreislauf eingebracht werden. Dieser Ausgleich kann nicht vollständig sein, es ist immer eine Kontrolle durch Formstoffuntersuchungen des Sandlabors notwendig, um ein langsames Wegdriften der Parameter zu verhindern. Diese beiden Korrekturwerte erlauben die Eingabe dieser Korrekturen in das Programm. Die hier eingegebenen Werte werden zur den anhand der Modellplattendaten berechneten Einstellwerten addiert, um die auf den Produktionsplänen ausgedruckten Soll-Einstelldaten zu bestimmen.

**Sollwert Bentonit/Glankkohlenstoffbildner** : Dies sind die Zielgrößen der vorbeugenden Steuerung.

**Verfügbarkeit** : Die in der Modellplattendatei abgelegten Taktzeiten wurden, z. B. mit Hilfe einer Stopuhr, während der Produktion bestimmt. Zur Berechnung der Produktionspläne ist allerdings auch das Auftreten von Störungen und Pausen zu berücksichtigen. Die hier eingegebene Verfügbarkeit wird in eine Verlängerung der Taktzeit umgerechnet.

**Korrektur Taktzeit Disa3** : Die beiden Formanlagen Disa2 und Disa3 unterscheiden sich, auch bei gleichen Modellplattenmaßen, im Aufbau. Es wurden unterschiedliche Steuerungen benutzt, und auch unterschiedliche Kerneinleger. Daher ergeben sich bei einer Platte unterschiedliche Taktzeiten auf beiden Anlagen. Die Taktzeitdifferenz der beiden Anlagen kann hier gespeichert werden. Eine getrennte Speicherung beider Taktzeiten, für jede Modellplatte, innerhalb der Modellplattendatei wurde nicht vorgenommen, da während der Datenaufnahme die meisten Platten nur auf einer Formanlage verwendet wurden.

Bei der Fa. Woeste werden die Tages-Produktionspläne der beiden Formanlagen recht kurzfristig erstellt. Sie müssen auch häufig innerhalb des Produktionstages geändert werden, z. B. bei Defekten auf der Modellplatte oder bei Eilaufträgen. Daher wurde der Computer mit dem Steuerungsprogramm in der Nähe des Steuerstands Sandaufbereitung installiert, um bei Änderungen schnell eine Neuberechnung des Produktionsplans durchführen zu können. Dies ist auch möglich, wenn sich gegenüber der Modellplattendatei unterschiedliche Taktzeiten oder Ballendicken ergeben. Die Produktionspläne werden unter dem Produktionsdatum abgelegt, sie können jederzeit erstellt oder geändert werden.

Die Maske zur Eingabe der Produktionspläne listet bereits eingegebene Modellplatten und ihre Stückzahlen auf. Das Programm berechnet nach jeder Eingabe die Umspannzeiten aus, sowie die Flüssigeisen, Formstoff- und Kernstoffmengen sowie die sich ergebenden Zugabemengen. Für die beiden Formanlagen gibt es zwei Bildschirmmasken, so dass die Produktionspläne getrennt eingegeben werden können.

```

      Á Vorbeugende Steuerung - Produktionsplan 29.07.99 ä
Art. DISA 3 CodeNr  Ballen Zeit Forms.Kerns. Eisen Bent.  GKB Bent.  GKB
                Stk      t      t      t      kg      kg      kg
370/380 F 1"      790 06:00 34.6  0.0  15.0  156  148  9.9  9.4
372 F 1 1/4      390 09:24 17.1  0.0   5.1   53   50   6.8  6.4
374 F 1 1/4       85 11:05  4.1  0.0   1.1   11   11   6.1  5.8
Plettac 0021      380 11:29 19.7  0.7   7.2  133  106 14.3 11.4
*Ende*           1645 13:07 75.5  0.7  28.4  353  314
    
```

Return=Eingabe F2=Speichern F3=Berechnen Umsch-F1=Drucken Esc=Zurück

Abb. 105 : Eingabemaske ‚Produktionsplan‘

Bei der Eingabe der Produktionsdaten kann neben der Modellplattennummer und der Ballenzahl auch eine Korrektur der Taktzeit und Ballendicke erfolgen. Diese Werte werden dann zur Berechnung benutzt, aber nicht in der Modellplattendatei abgelegt. Änderungen der Modellplattendatei müssen immer manuell vorgenommen werden. Wegen der uneinheitlichen Benennung der Modellplatten kann das Programm eine Liste ähnlicher Modellplattenbezeichnungen zur Auswahl anbieten, wenn die eingegebene Modellplattennummer nicht in der Datei vorhanden ist.

```

      Á Vorbeugende Steuerung - Produktionsplan 29.07.99 ä
Art. DISA 3 CodeNr  Ballen Zeit Forms.Kerns. Eisen Bent.  GKB Bent.  GKB
                Stk      t      t      t      kg      kg      kg
370/380 F 1"      790 06:00 34.6  0.0  15.0  156  148  9.9  9.4
372                                     4
374                                     8
Ple   Platte       : 370/380 F 1"
*En   Ballen       :   790   stk
      Taktzeit     :  13.20 sek (Modellplattendatei : 13.20 sek)
      Ballendicke  :  19.00 cm (Modellplattendatei : 19.00 cm)
    
```

Ballendicke eingeben

Abb. 106 : Eingabe der Produktionsdaten einer Modellplatte

Die beiden Bildschirmseiten zur Eingabe der Produktionspläne beider Formanlagen zeigen nur die Zugabemengen an Bentonit und Glanzkohlenstoffbildnern, die zum Ausgleich für jede Einzelanlage notwendig wäre. Auf einer dritten Bildschirmseite werden die Daten zusammengefasst und als Steuerungsanweisung ausgegeben. Dabei werden die zeitgleichen Produktionen beider Anlagen addiert, jeweils für einstellbare Zeitbereiche. Bei der ersten Einführung des Programms wurden von einer Korrektur der Zugabewerte alle zwei Stunden ausgegangen. Das Programm berechnet für jedes dieser Zwei-Stunden-Intervalle die Produktionsdaten beider Maschinen und bestimmt daraus die notwendigen Zugabemengen.

A Vorbeugende Steuerung - Produktionsplan 29.07.99 ä								
	Ballen	Forms.	Kerns.	Eisen	Bent.	GKB	Bent.	GKB
	t	t	t	t	kg	kg	kg/M	kg/M
06:00-08:00	892.8	40.4	0.000	14.0	146	138	7.94	7.51
08:00-10:00	888.6	40.4	0.000	13.1	136	129	7.42	7.02
10:00-12:00	880.9	41.4	0.224	11.7	140	126	7.40	6.68
12:00-14:00	686.8	33.6	0.496	10.1	144	123	9.31	7.92
14:00-16:00	425.0	20.5	0.000	5.5	57	54	6.12	5.79
16:00-18:00	50.8	2.5	0.000	0.7	7	7	6.15	5.82
Summe :	3825.0	178.8	0.720	55.1	630	576		

Return=Eingabe F2=Speichern F3=Berechnen Umsch-F1=Drucken Esc=Zurück

Abb. 107 : Steuerungsanweisung

Die so eingegebenen und berechneten Produktionspläne können als Steuerungsanweisung ausgedruckt und zur Produktion benutzt werden.

Zur Berechnung der Zugabemengen wird das nachfolgend beschriebene Verfahren benutzt. Diese Berechnung wird für jede Modellplatte der beiden Formanlagen getrennt vorgenommen, wobei auf die Daten der Modellplattendatei zurückgegriffen wird.

Anhand der Ballendicke und der Maße der Modellplatte wird das Ballenvolumen berechnet. Zusammen mit der Dichte des verdichteten Formstoffs kann damit das Gewicht eines Ballens bestimmt werden, wobei der Ballen als Vollquader angenommen wird, der Formhohlraum also nicht berücksichtigt wird. Als Dichte des Formstoffs wurde die Dichte von hergestellten Normprüfkörpern benutzt. Multipliziert mit der Anzahl zu produzierender Ballen ergibt sich die gesamte zur Produktion benötigte Formstoffmenge.

Die in der Modellplattendatei gespeicherten Kerngewichte werden addiert, und die Gewichte der nicht in den Formstoffkreislauf gelangenden Kernreste von dieser Summe abgezogen. Multipliziert mit der Anzahl zu produzierender Ballen erhält man die Gesamt-Kernstoffmenge, die in den Formstoffkreislauf gelangt.

Die zu errechnende Bentonitzugabe muss den Kernsandzulauf und den Bentonitabbrand ausgleichen. Da der hinzugekommene Kernsand keinen Bentonit enthält, muss dieser Anteil auf die Soll-Bentonitkonzentration gebracht werden. Die dazu notwendige Zugabemenge errechnet sich als Produkt aus Gesamt-Kernsandzulauf und Soll-Bentonitkonzentration. Der Bentonit-Abbrand wird in der ersten eingesetzten Programmversion als proportional zur Flüssigeisenmenge angesetzt, wobei der Proportionalitätsfaktor anhand vorhandener Aufschreibungen so gewählt wurde, dass in der Summe die berechneten Zugabemengen mit den Aufschreibungen übereinstimmen. Die ebenfalls erfassten Gussstück-Wandstärken werden nicht berücksichtigt. Die Summe dieser beiden Anteile ergibt die Gesamt-Bentonitzugabe, wieder bezogen auf die gesamte Produktion mit dieser Modellplatte.

Eine entsprechende Rechnung wird für die Glanzkohlenstoffbildnerzugaben durchgeführt. Die Soll-Glanzkohlenstoffbildnerkonzentration und die Proportionalitätsfaktoren können dabei getrennt festgelegt werden.

Anhand der gespeicherten Taktzeiten wird eine Prognose der Umspannzeiten berechnet. Die ermittelten Zugabemengen, die sich auf die komplette Fertigung mit einer Modellplatte auf einer Formanlage beziehen, werden dann anhand dieser Umspannzeiten zeitgleich zusammengefasst.

Eine Änderung der Zugabemengen bei jedem Umspannen auf einer der beiden Formanlage ist für die Fa. Woeste nicht möglich. Insbesondere bei Störungen oder bei der Erprobung von Nullserien wäre eine sehr häufige Umstellung der Dosierung notwendig. Das Bedienpersonal der Sandaufbereitung hat aber auch weitere Aufgaben zu erfüllen, so zum Beispiel die Bestimmung der Formstoffparameter, die einmal pro Stunde durchgeführt werden, die Probenahmen für die Analysen des Sandlabors sowie regelmäßige Kontrollgänge.

Daher wurde hier ein anderer Ansatz gewählt. Das Programm gibt feste Zeitpunkte vor, zu denen eine Umstellung der Zugabemengen erfolgen muss, z. B. alle ein, zwei oder vier Stunden. Dies erlaubt dem Anlagenbediener eine zeitliche Planung seiner Arbeiten. Bei Störungen oder Änderungen kann sofort eine Neuberechnung erfolgen, so dass mit einer Anpassung der Einstellmengen reagiert werden kann.

#### 4.5.2 Steuerung der Wasserzugabe

Zur Online-Steuerung der Formstoffaufbereitung wurde das schon beschriebene Verdichtbarkeitsmessgerät neben dem Mischer installiert. Eine vorhandene Probenahmeöffnung im Mischertrog wurde mit einem pneumatischen Verschluss versehen, so dass diese Öffnung vom Steuerprogramm des Verdichtbarkeitsmessgerätes geöffnet und wieder geschlossen werden konnte. Bei geöffnetem Verschlussstopfen wurde bei laufendem Mischer genug Formstoff ausgetragen, um die Prüfkörperhülse in wenigen Sekunden zu füllen.



Abb. 108 : Anordnung des Verdichtbarkeitsmessgerätes am Mischer

Das Programm der SPS zur Mischersteuerung wurde so geändert, dass nach dem Befüllen des Mixers eine Vormischzeit von 10 Sekunden eingeführt wurde, um eine Vorhomogenisierung des Mischerinhalts zu erreichen. Nach Ablauf der Vorhomogenisierungszeit wurde die Probenahmeöffnung für 5 Sekunden geöffnet, um die Prüfkörperhülse zu füllen. Um eine Verunreinigung der Probe durch aufbereiteten Sand der vorigen Mischung zu verhindern, wurde der Boden der Prüfkörperhülse erst nach zwei Sekunden geschlossen, so dass eventuelle Formstoffreste, die zum Beginn der Füllung ausgetragen werden, durch die Hülse fallen konnten und so ignoriert wurden. Die Füllzeit nach dem Schließen des Bodens war immer noch ausreichend, die Hülse sicher zu füllen. Beim Verlassen des Mixers war der noch nicht aufbereitete Formstoff durch die permanent laufenden Wirbler genügend aufgelockert, so dass er ohne weitere Maßnahmen zur Messung der Verdichtbarkeit benutzt werden konnte.

Die vorhandene Installation zur Wasserdosierung wurde so ergänzt, dass parallel zur vorhandenen Anlage ein zusätzlicher Zweig mit elektrisch steuerbarem Ventil und einer Wasseruhr mit Impulsausgang eingefügt wurde. Mit Hilfe von Handventilen war es möglich, wahlweise die vorhandene Wasserdosierung (Fabrikat Lippke) oder die Steuerung über das Verdichtbarkeitsmessgerät zu benutzen. Bei der Nutzung des Verdichtbarkeitsmessgerätes musste zusätzlich in der Schaltwarte der Formstoffaufbereitung eine Umschaltung erfolgen, um die Lippke-Steuerung zu deaktivieren. Alle Versuche zur Steuerung der Wasserdosierung wurden während der Produktionszeit der Gießerei durchgeführt, so dass bei notwendigen Anpassungen eine schnelle Umschaltung auf die konventionelle Steuerung notwendig war.

Zur Messung der Formstofftemperatur wurde im Wägebehälter oberhalb des Mischers ein zusätzlicher Temperaturfühler installiert. Da in diesem Wägebehälter auch die Elektroden zur Feuchtemessung der Lippke-Steuerung installiert waren, wurde der Temperaturfühler in der Seitenwand des Behälters installiert, entsprechend dem Temperatursensor der Lippke-Steuerung. Die gemessenen Temperaturen wurden kontinuierlich vom Steuerprogramm des Verdichtbarkeitsmessgerätes erfasst und in einem Ringspeicher abgelegt, um auch nach dem Beginn der Aufbereitung, wenn der Wägebehälter schon geleert war, für die Regelalgorithmen verfügbar zu sein.

Eine Anforderung an die neue Regeleinrichtung war, dass neben der Vormischzeit von 10 Sekunden keine weitere Verlängerung der Mischzeit erfolgen sollte. Das Steuerprogramm des Verdichtbarkeitsmessgerätes wurde daher so optimiert, dass die Verdichtbarkeitsdaten möglichst schnell nach Beginn der Messung bestimmt wurden. Da nach dem Befüllen der Prüfkörperhülse die Bestimmung der Verdichtbarkeit trotzdem ca. 5 Sekunden benötigt, wurde parallel zur Messung die Wasserdosierung in den Mischer schon begonnen. Dabei wurde eine Wassermenge vorgegeben, die sicher unterhalb der notwendigen Zugabemengen lag. Die Messung der Verdichtbarkeit erfolgte dann während dieser Zugabe, so dass dann anhand der Fuzzy-Regelung die Vorgabe der Wassermenge korrigiert werden konnte. Nach Erreichen der berechneten Wassermenge wurde die Zugabe dann vom Steuerprogramm gestoppt, und nach Ablauf der Mischzeit wurde der Mischerinhalt in den Ausgabebunker geleert.

Bis auf die Bereitstellung des Startsignals an die Steuerung des Verdichtbarkeitsmessgerätes (Zeitgleich mit dem Öffnen bzw. Schließen der Entnahmeverrichtung am Mischer) war dadurch kein weiterer Eingriff in die vorhandene Mischersteuerung notwendig.

Alle Versuchsreihen wurden in Zusammenarbeit mit dem Bediener der Sandaufbereitungsanlage durchgeführt. Bei der ersten Versuchsreihe wurde nach jeder Mischung eine Formstoffprobe aus dem Ausgabebunker entnommen, und es wurde manuell die Verdichtbarkeit des Fertigsands bestimmt. Das Steuerprogramm des Verdichtbarkeitsmessgerätes dokumentierte jede einzelne durchgeführte Mischung, so dass eine nachträgliche Auswertung möglich war. Um eine Anpassung der Regelung an die jeweils geforderte Formstoffqualität (Ziel-Verdichtbarkeit) zu ermöglichen, wurde ein Potentiometer installiert, mit dem die errechnete Wassermenge manuell im Bereich +/- 10 Liter verändert werden konnte. Die Fuzzy-Parameter der Regelung wurden so gewählt, dass ein Kennlinienfeld ohne Stufen oder Unstetigkeiten erzeugt wurde, wobei die Daten der Vorversuche zur Festlegung der Kennlinien benutzt wurden.

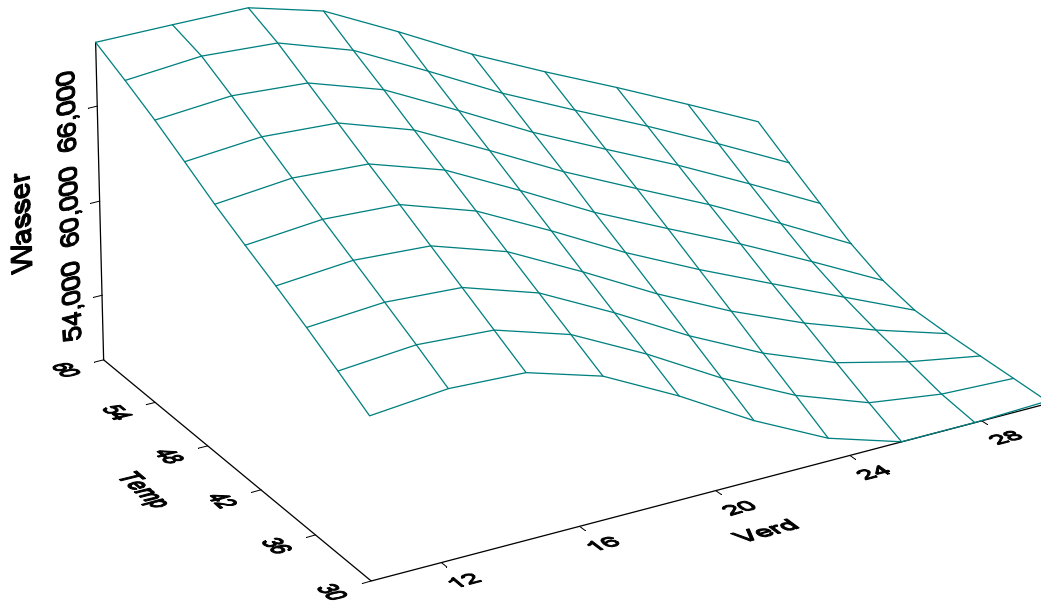


Abb. 109 : Kennlinienfeld der Fuzzy-Regelung bei den ersten Versuchen

Im Laufe der Versuche wurden die Reglerparameter dann langsam angepasst, wenn systematische Regelabweichungen erkannt wurden.

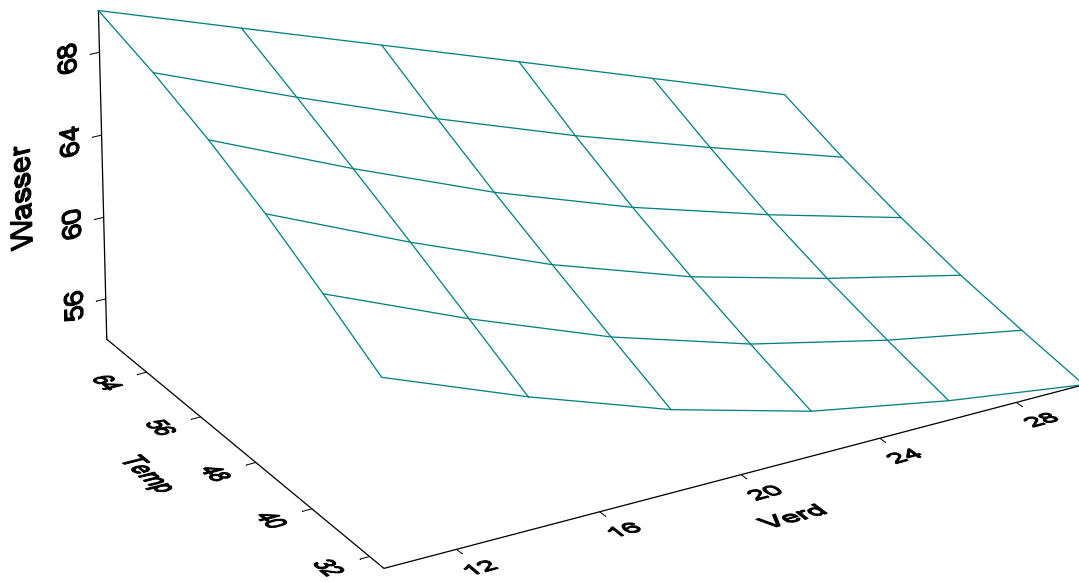


Abb. 110 : Kennlinienfeld der Fuzzy-Regelung nach der Einführungsphase

Zur Weiterführung der Versuche wurde dann ein zweites, baugleiches Verdichtbarkeitsmessgerät zur Beurteilung des Fertigsands eingesetzt. Dieses Gerät wurde neben dem Förderband platziert, das den Formstoff aus dem Fertigsandbunker unter dem Mischer zu den Disamatik-Formanlagen befördert. Dazu wurde in die Seitenwange des Förderbands eine verschließbare Öffnung geschnitten, durch die eine Edelstahlgabel in den vorbeitransportierten Formstoff geschoben wurde. Dadurch wurde ein kleiner Teil des Formstoffs abgeleitet und über eine Rutsche in den Aufgabetrichter des Verdichtbarkeitsmessgerätes geleitet. Um den Formstoff zur Befüllung der Prüfkörperhülse aufzulockern, wurde er motorisch durch ein Metallsieb mit 3 mm Maschenweite gestrichen.

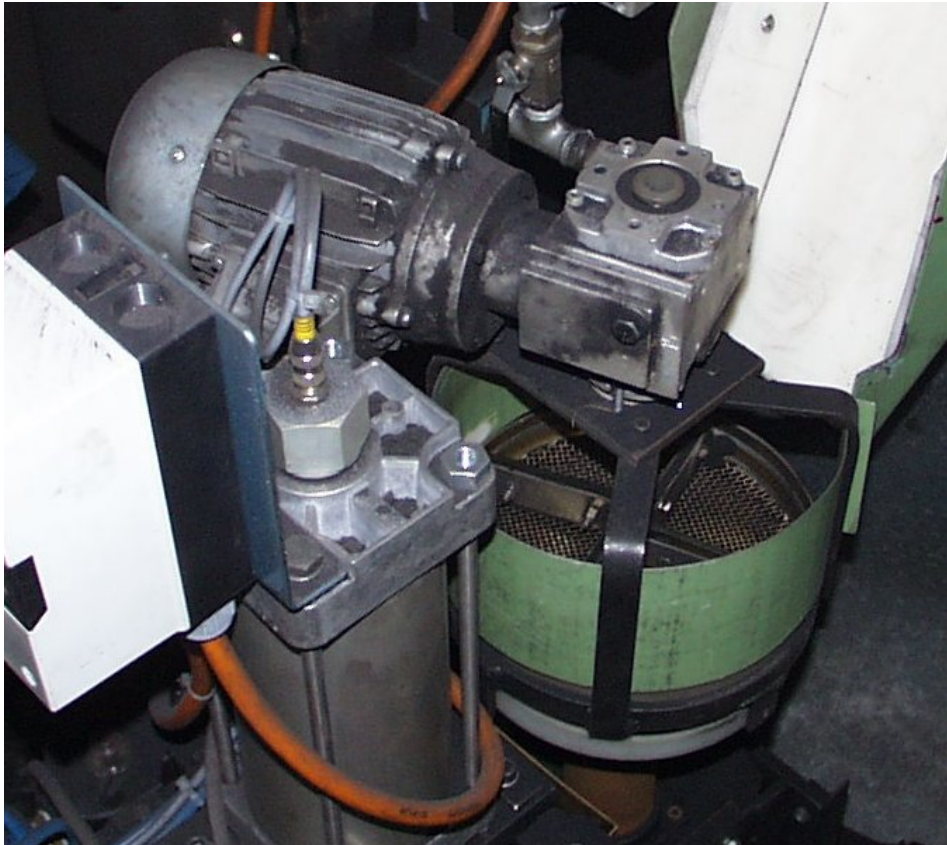


Abb. 111 : Einrichtung zur Auflockerung des Formstoffs bei der Probenahme

Wegen der räumlichen Trennung beider Messgeräte wurde das zweite Gerät mit einem eigenen PC zur Steuerung ausgestattet. Die Messergebnisse wurden über eine serielle Datenverbindung zum ersten Steuerrechner übertragen und dort gespeichert. Zur Ablaufsteuerung wurde das Anlaufen dieses Förderbandes an den Steuerrechner des zweiten Verdichtbarkeitsmessgerätes gemeldet. Das Steuerprogramm wurde so erweitert, dass das Öffnen der Entnahmestelle und das Einschieben der Ableitgabel von ihm ausgelöst wurden. Es erwies sich als notwendig, die Entnahmeöffnung sofort nach Anlaufen des Förderbandes freizugeben. Die Gabel wurde dabei erst später in den Formstoff geschoben, so dass die Probe ungefähr aus der Mitte des Formstofftransports entnommen wurde.

Zwischen den einzelnen Messungen blieb der Boden der Prüfkörperhülse geöffnet, so das eventuelle Formstoffreste ablaufen konnten. Die Flügel, die den Formstoff durch das Metallsieb strichen, wurden während der Versuche permanent angetrieben. Ihre Geschwindigkeit war ausreichend, um eventuell in das Sieb fallende Knollen oder Metallreste nach kurzer Zeit zur Seite auszutragen.



Nach Beginn der Probenahme vom Transportband wurde der Boden der Prüfkörperhülse erst nach ca. 5 Sekunden geschlossen, so dass Sandreste auf dem Förderband oder von der Bunker-Seitenwand weitgehend unberücksichtigt blieben.



Abb. 112 : Anordnung des Verdichtbarkeitsmessgerätes zur Überwachung des Fertigsands

Es zeigte sich dabei, dass Formstoffreste, die an der Rutsche hängen bleiben, schnell zu einem Aufbau einer recht gleichmäßigen Schicht führten. Bei den dort herrschenden hohen Temperaturen von 40 bis 50 °C trocknete diese Schicht dann schnell aus und führte bei weiteren Messungen zu einer vermeintlich niedrigen Fertigsand-Verdichtbarkeit, da bei jeder Formstoffentnahme von der Oberfläche ein Teil des trockeneren Formstoffs abgelöst und in die Prüfkörperhülse eingetragen wurde. Zur Vermeidung dieses Effektes wurde die Rutsche versuchsweise mit verschiedenen Materialien ausgekleidet, z. B. Edelstahlblechen oder Teflonplatten. Eine weitgehende Vermeidung von Anbackungen konnte durch eine Auskleidung mit einem metallbeschichteten Gewebe erreicht werden. Trotzdem musste die Probenahme überwacht werden, und kleine Anbackungen mussten entfernt werden, bevor sie zum Aufbau größerer Formstoffmengen führten.

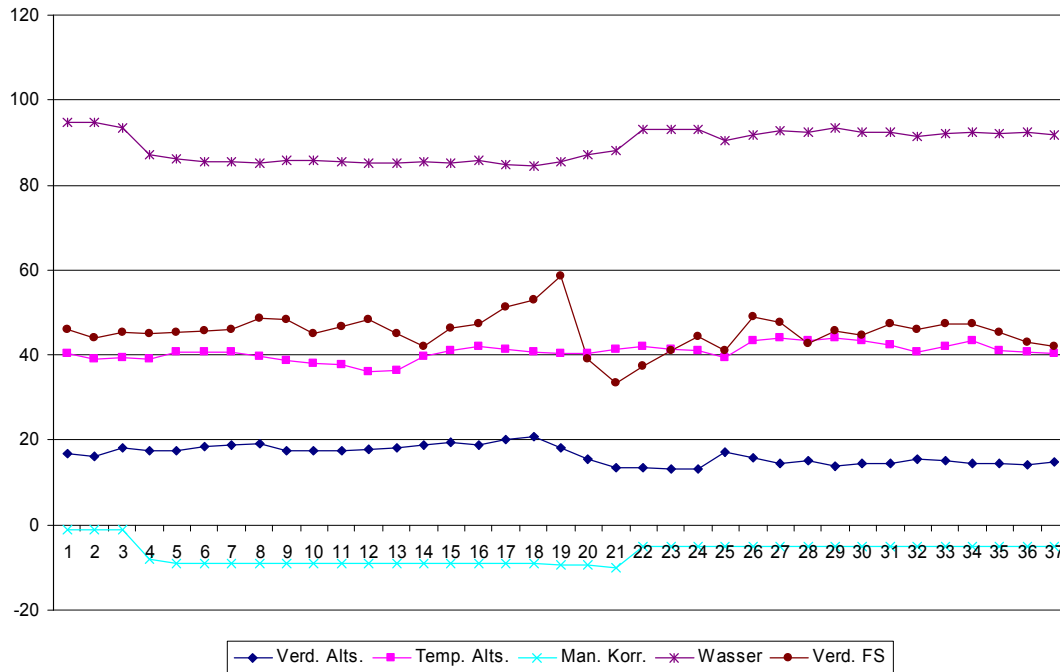


Abb. 113 : Aufschreibung einer Versuchsreihe, Gegenüberstellung von Altsand- und Fertigsanddaten

Beispielhaft ist hier die Aufschreibung eines Versuchs dargestellt (9.2., 8:00 bis 12:00). Es ist neben den Ein- und Ausgangsdaten der Regelung auch die notwendige Korrektur ersichtlich. Man erkennt deutlich, dass die Verdichtbarkeit des Fertigsands, bis auf den Bereich einer Störung ab Mischung 18, ausreichend genau der Ziel-Verdichtbarkeit von 45% folgt.

Die notwendigen manuellen Korrekturen (Untere Kurve im Diagramm) waren in ungefähr demselben Maß wie bei der Lippke-Steuerung notwendig. Die Ursache der Störung lag dabei in der Messung der Fertigsand-Verdichtbarkeit, der Formstoff war verwendbar, so dass der Versuch nicht abgebrochen werden musste. Die nächsten Mischungen lagen dann in der Fertigsandverdichtbarkeit etwas niedrig, konnten aber noch verwendet werden, und daher wurde ab Mischung Nr. 21 die manuelle Korrektur verändert, um die Fertigsandfeuchte und damit die Fertigsandverdichtbarkeit wieder etwas anzuheben.

### 4.5.3 Steuerung der Bentonitzugabe

Im Rahmen der Formstoffüberwachung bei der Fa. Woeste wird zweimal am Tag eine Formstoffprobe entnommen, jeweils um ca. 7:00 Uhr und 10:30 Uhr. Die Probe wird dabei dem Fertigsandband hinter dem Mischer entnommen (ungefähr an der Position des Fertigsand-Verdichtbarkeitsmessgerätes) und repräsentiert daher diese eine Mischung. Diese Proben werden dann ins Formstofflabor transportiert und dort untersucht. Ungefähr im Stundenabstand werden weitere Formstoffproben entnommen, um im Labor der Formstoffaufbereitung die Verdichtbarkeit und Gasdurchlässigkeit zu bestimmen.

Die Zugabemengen an Bentonit, Glanzkohlenstoffbildnern, sowie die Feinstaubrückführung aus der Abluft-Entstaubungsanlage werden in der Schaltwarte der Formstoffaufbereitungsanlage eingestellt. Dies erfolgt manuell durch Ändern der Einstellungen an den Wägeeinrichtungen. Die Festlegung der Sollwerte erfolgt anhand der Formstoffanalysen sowie den Erfordernissen des zu fertigenden Produktspektrums bzw. als Reaktion auf auftretende Gussfehler. Im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchungen wurden die Vorschläge der vorbereitenden Formstoffsteuerung berücksichtigt. Im Allgemeinen wurden dabei die Zugabemengen nur langsam und im Abstand mehrerer Tage verändert, und nur bei auftretenden Problemen wurden häufigere Korrekturen durchgeführt.

Bedingt durch den Aufbau des Formstoffkreislaufs ist eine schnelle Durchmischung bzw. Vergleichmäßigung des Formstoffs nicht zu erwarten. Eine Aufteilung und Zusammenführung verschiedener Formstoffströme findet nur durch die Produktion mit zwei Formanlagen unterschiedlicher Taktzeiten und Sandverbräuche statt. Eine Vergleichmäßigung durch eine entsprechende Bunkerstrategie ist mit der vorhandenen Anlage nicht durchführbar.

Um zu prüfen, wie weit der Aktivbentonitgehalt mehrerer aufeinanderfolgenden Mischungen schwankt, wurden während eines Versuchstags parallel zu den weiteren Versuchen in kurzen Abständen Formstoffproben genommen und im Anschluss auf den Aktivbentonitgehalt untersucht. Der Abstand der Probenahmen wurde dabei zu ca. 15 Minuten gewählt, so dass mit 6 Analysen ungefähr ein Umlauf des Formstoffs abgedeckt wurde.

Uhrzeit	Aktivbentonitgehalt [%]
12:31	9,07
12:48	9,07
12:57	8,85
13:11	8,85
13:24	8,96
13:39	8,85

Tab. 10 : Aktivbentonitgehalt

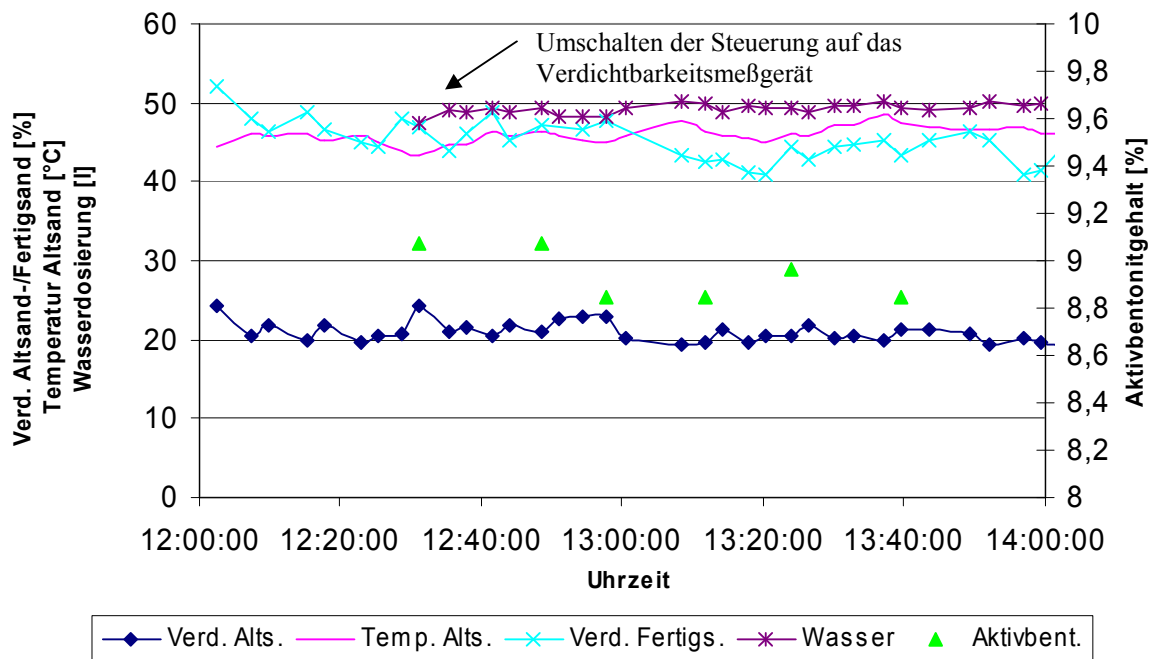


Abb. 114 : Verlauf der Aktivbentonitkonzentration

Die gemessenen Aktivbentonitkonzentrationen schwanken zwischen 8,85 und 9,07 %. Dies entspricht ungefähr der erreichbaren Messgenauigkeit des eingesetzten Bestimmungsverfahrens (Methylenblau/Tüpfelmethode). Die Schwankungen der Altsand-Temperatur und -Verdichtbarkeit, und die daraus resultierenden Schwankungen der Regelgröße Wasserzugabe sowie der Fertigsandverdichtbarkeit, machen es schwierig, aus den gespeicherten Prozessdaten einen Rückschluss auf die Aktivbentonitkonzentration zu ziehen. Man kann erkennen, dass ab ca. 13:00 Uhr die gemessenen Aktivbentonitgehalte zurückgehen. Praktisch gleichzeitig geht die Altsand-Verdichtbarkeit auch etwas zurück (im Mittel um ca. 2%), und auch die Fertigsandverdichtbarkeit fällt etwas ab.

Um Daten für eine größere Spanne der Aktivbentonitkonzentration zu erhalten, wurde an 6 aufeinanderfolgenden Produktionstagen die durchschnittlich notwendige Wasser-Dosiermenge je Charge über die gesamte Produktionszeit ermittelt und der Bentonitkonzentration gegenübergestellt. In diesem Zeitraum schwankt die Aktivbentonitkonzentration zwischen 7 % und 9 %.

Datum	Bent. 1 %	Bent. 2 %	Bent. Mittelw. %	Verd. Alts. %	Temp. Alts. %	Wasser l
02. Feb	7,79	7,57	7,7	19,7	44,4	59,4
03. Feb	6,72	7,68	7,2	19,0	43,0	59,8
04. Feb	6,51	7,52	7,0	17,2	42,8	60,9
07. Feb	7,79	7,57	7,7	17,4	40,4	60,4
08. Feb	7,79	7,68	7,7	20,9	45,9	59,4
09. Feb	9,28	8,64	9,0	17,7	41,5	57,9

Tab. 11 : Gegenüberstellung Wasserbedarf/Aktivbentonitkonzentration

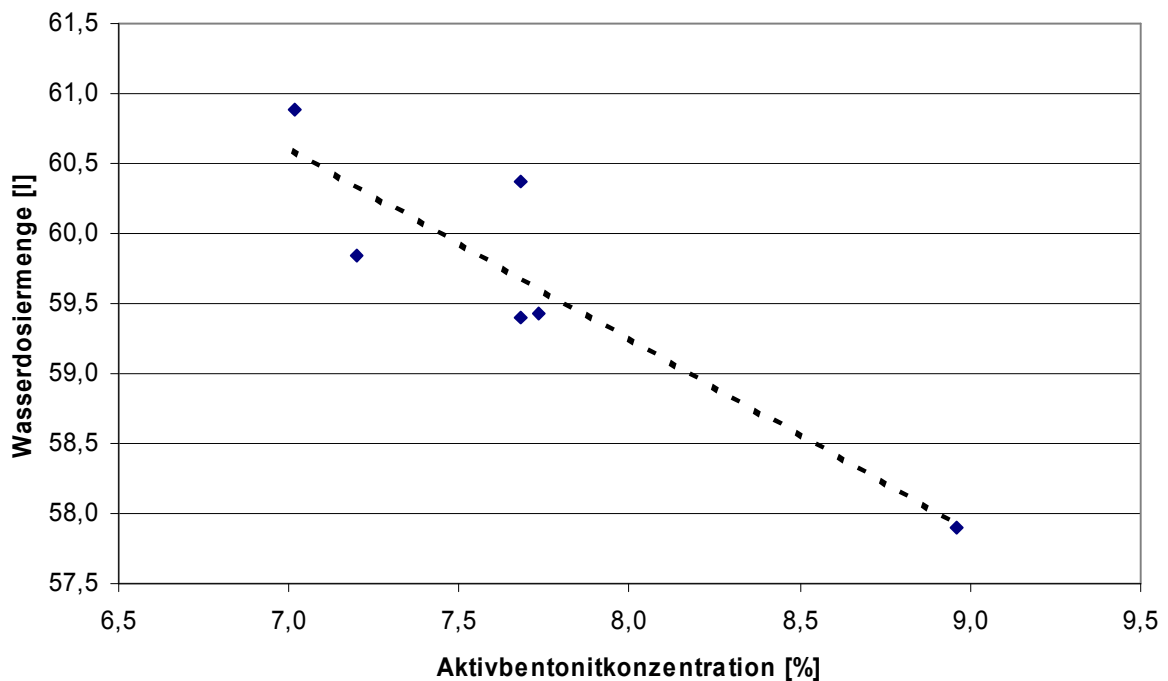


Abb. 115 : Abhängigkeit zwischen Aktivbentonitkonzentration und mittlerer Wasserdosiermenge, an 6 aufeinanderfolgenden Produktionstagen

Die Abhängigkeit zwischen Aktivbentonitkonzentration und Wasserdosierung ist deutlich zu erkennen und durch die im obigen Diagramm eingetragene Regressionsgerade angedeutet. Während der laufenden Produktion hängt die Wasserzugabe natürlich nicht nur von der Aktivbentonitkonzentration ab, sondern auch von der Formstoff-Vorgeschichte, die die Formstofftemperatur und –verdichtbarkeit beeinflusst und damit auch die Wasserzugabemengen. Außerdem wird im normalen Produktionsablauf die Ziel-Formstofffeuchte bzw. Ziel-Verdichtbarkeit an die zu fertigenden Produkte angepasst, um Abformungsproblemen entgegenzuwirken. Das Regelverhalten bei der Wasserzugabe kann daher nur ein Indikator für die aktuelle Aktivbentonitkonzentration sein.

## 5 Beurteilung der Ergebnisse

Das hier vorgestellte automatisch arbeitende Formstoffprüfgerät ist zur Messung der Formstoffverdichtbarkeit unter Praxisbedingungen geeignet. Die ermittelten Werte sind vergleichbar den manuell ermittelten Laborprüfwerten.

Dagegen war die Ermittlung der Scherfestigkeit mit den beiden gebauten Prototypen nicht befriedigend möglich. Die interne Reibung der Bodenplatte, die zum Abscheren des Prüfkörpers benutzt wird, verfälscht die Messung der Scherkraft zu stark. Beide Prototypen verwenden einfache Gleitlager zur Führung der Bodenplatte und der Prüfkörperhülse. Es wäre sicher möglich, die Reibungskräfte zu reduzieren, indem z. B. Linearkugellager eingesetzt werden. Bei den Prototypen war aber aus Platzgründen ein entsprechender Umbau nicht möglich.

Die Regelung der Wasserzugabe mit Hilfe eines Fuzzy-Reglers, beruhend auf der Messung der Altsandverdichtbarkeit und Altsandtemperatur, konnte recht schnell in die vorhandene Formsandaufbereitungsanlage integriert werden. Die Praxisversuche bei der Fa. Woeste haben gezeigt, dass die erreichbare Gleichmäßigkeit der Fertigsandqualität schon nach kurzer Zeit der einer konventionellen Steuerung entspricht. Allerdings konnten die Unzulänglichkeiten der vorhandenen Sandaufbereitungsanlage, wie z. B. die unzureichenden Kühleinrichtungen oder die plötzlichen Schwankungen des Altsandzustands aufgrund einer fehlenden Vergleichmäßigung des Formstoffs, noch nicht vollständig ausgeglichen werden.

Eine direkte Regelung der Bentonitzugabe konnte im Rahmen der durchgeführten Betriebsversuche nicht erprobt werden, da die Änderung der Zugabemengen nur durch manuelle Eingabe an der Wägesteuerung erfolgen konnte. Die Versuchsergebnisse lassen auch nicht erkennen, dass anhand der Beurteilung einer einzelnen Charge eine Festlegung der notwendigen Bentonitzugabe erfolgen könnte, unabhängig davon, dass bei Beginn der Altsand-Probenahme, zum Ende der Vorhomogenisierungszeit, die Zugabe des Bentonits und Glanzkohlenstoffbildners schon erfolgte. Dies war aufgrund der überlagerten Regelschwankungen aber auch nicht zu erwarten. Eine Beurteilung der Aktivbentonitkonzentration ist nur längerfristig, unter Berücksichtigung mehrerer aufeinanderfolgenden Chargen, möglich, was aber auch den betrieblichen Bedingungen entspricht. Eine Laborkontrolle des Aktivbentonitgehalts wird immer notwendig sein, allerdings in größeren zeitlichen Abständen. Der Einsatz eines Programms zur vorbeugenden Formstoffsteuerung ist sinnvoll, um Schwankungen der Formstoffqualität zu reduzieren und dadurch die notwendigen Eingriffe der Steuerung zu reduzieren.

### 5.1 Verfahrensablauf zur Einführung des Steuerungskonzeptes

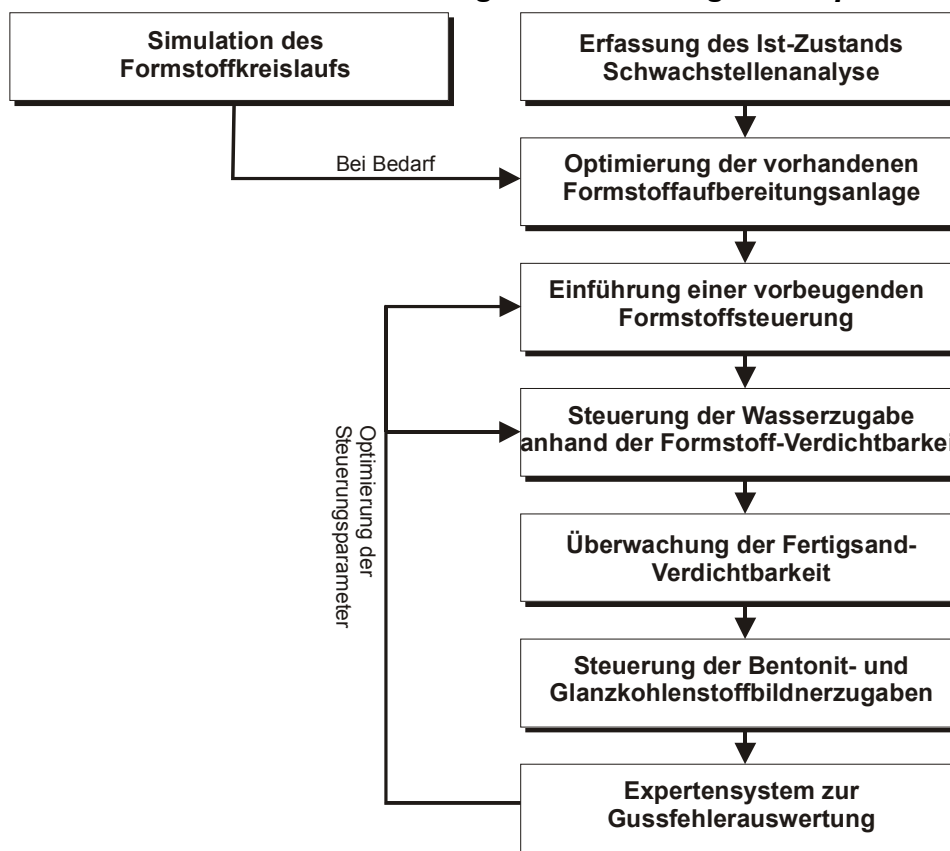


Abb. 116 : Vorgehensweise bei der Einführung des neuen Steuerungskonzeptes

Erster Schritt sollte immer die Aufnahme des Ist-Zustands der Gießerei sein. Eine genaue Analyse des Ist-Anlagenzustands kann Schwachstellen aufzeigen, die im Vorfeld soweit möglich beseitigt werden sollten. Insbesondere die Punkte Formstoffkühlung und -vergleichmäßigung sollten besondere Beachtung finden. Hier ist meist bei vorhandenen Anlagen mit wenig Aufwand eine merkliche Verbesserung zu erreichen, entweder durch Wartung und Justierung der vorhandenen Einrichtungen, oder durch einfache Ergänzungen wie z. B. eine Vorbefeuchtung des Formstoffs auf den Transportbändern.

Zur Schwachstellenanalyse, oder um zu prüfen, welche Auswirkungen ein bestimmtes Produktionsprogramm auf das Formstoffsystem hat, kann eine Simulation des Formstoffkreislaufs sinnvoll sein. Die notwendigen Produktdaten sollten heute weitgehend vorhanden und in entsprechenden Datenbanken abgelegt sein. Zur Anpassung der Simulation ist dabei eventuell die zusätzliche Installation von Temperatursensoren im Formstoffkreislaufsystem notwendig, sowie eine manuelle Erfassung von Formstofffeuchten. Im Laufe der Zeit wird dabei eine Wissensbasis aufgebaut, die das Verhalten üblicher Aggregate beschreibt und damit die Erstellung einer Anlagensimulation erleichtert.

Der nächste Schritt sollte die Nutzung eines Programms zur vorbeugenden Formstoffsteuerung sein. Solche Programme sind von verschiedenen Anbietern verfügbar und an die speziellen Bedürfnisse einer Gießerei anzupassen. Die meisten Daten, die von solch einem Programm benötigt werden, sind leicht verfügbar und können eventuell übernommen werden, so z. B. Gussstück- und Traubengewichte. Weitere Daten, zum Beispiel Werte für den Bentonitabbrand, können der Literatur entnommen und später an die aktuellen Verbräuche angepasst werden. Praxisversuche sind notwendig zur Ermittlung des Kernsandzulaufs, z. B. durch Erfassung der Kerngewichte und ausgetragenen Kernsandknollen.

Die Nutzung dieser Maßnahmen wird zu einer weitgehenden Vergleichmäßigung der Formstoffqualität führen, ohne das aufwändige Änderungen der Formstoffaufbereitung notwendig sind.

Erst im Anschluss an diese Arbeiten sollte der Einsatz des Verdichtbarkeitsprüfgerätes zur Steuerung der Wasserzugabe im Mischer erfolgen. Es ist sinnvoll, ein weiteres Gerät zur Überwachung der Fertigsandqualität einzusetzen, zum einen zur Qualitätsüberwachung, aber auch zur internen Kontrolle der Regelabweichungen, um Rückschlüsse auf Veränderungen des Formstoffs zu ziehen. Eine

einwandfrei arbeitende Formstoffaufbereitung und vorbeugende Formstoffsteuerung erleichtert dabei die Erstellung der Regelalgorithmen und führt zu geringeren auszuregelnden Abweichungen, und damit zu einer gleichmäßigeren Fertigungsqualität. Das Programm zur Steuerung des Verdichtbarkeitsmessgerätes und zur Berechnung der Fuzzy-Regleralgorithmen speichert automatisch die Daten jeder einzelnen Charge, so dass eine nachträgliche Auswertung möglich ist, was Rückschlüsse auf den aktuellen Formstoffzustand wie Aktivbentonit- oder Schlammstoffkonzentration, unabhängig von den Laboranalysen, erlaubt.

Eine permanente Optimierung der so aufgebauten Regelstrategien kann durch eine Auswertung der Gussfehler erfolgen, sofern diese nach Art und Erscheinungsform erfasst werden. Das vorher beschriebene Expertensystem zur Beurteilung aufgetretener Gussfehler kann die erkannten Gussfehler auf mögliche Fehlerursachen beurteilen und Empfehlungen zur Abhilfe geben, was entweder zum Beheben von Anlagenstörungen oder –schwachstellen führen kann, oder zur Anpassung der Reglerparameter oder der Parameter der vorbeugenden Formstoffsteuerung.

## 6 Zusammenfassung

Das hier vorgestellte Regelungskonzept besteht aus mehreren Komponenten, um trotz der bekannten und unvermeidlichen Probleme bei der Regelung des Formstoffsystems eine weitgehende Konstanz der Formstoffqualität zu erzielen.

Die Wasserzugabe am Mischer wird dabei anhand der Verdichtbarkeit des Formstoffs vor Beginn der Dosierung berechnet. Zur Bestimmung der Verdichtbarkeit wurde ein automatisch arbeitendes Prüfgerät entwickelt und im Praxisbetrieb erprobt. Anhand der gemessenen Verdichtbarkeit und Formstofftemperatur berechnet dann ein Fuzzy-Algorithmus die notwendige Wasserzugabe. Das Prüfgerät erlaubt auch die Bestimmung der Scherfestigkeit des Formstoffs, allerdings bei dem Prototypen nur mit einer Streuung, die eine weitere Auswertung verhindern. Die auch ermittelten Schüttdichte des Formstoffs liefert gegenüber der Bestimmung der Verdichtbarkeit keine weitere Aussage.

Die Steuerung der Bentonit- und Glanzkohlenstoffbildnerzugaben erfolgt unter Ausnutzung verschiedener Regelverfahren, die mit unterschiedlicher Genauigkeit, aber auch unterschiedlicher Reaktionszeit, Aussagen über die aktuelle Aktivbentonitkonzentration und damit den Zustand des Umlaufformstoffs erlauben.

Zu einen wird dabei das Verfahren der präventiven Formstoffsteuerung benutzt. Dieses Verfahren ist heute erprobt und Stand der Technik. Anhand von einmal ermittelten Daten der Modellplatten wird dabei der Verbrauch von Bentonit bzw. Glanzkohlenstoffbildnern prognostiziert und dem Formstoffkreislauf wieder zugeführt. Ein entsprechendes Programm, angepasst an die lokalen Gegebenheiten, wurde für eine der beteiligten Gießereien entwickelt und dort installiert.

Weitere Aussagen über die Aktivbentonit- bzw. Glanzkohlenstoffbildnerkonzentration können anhand des Wasserbedarfs der einzelnen Mischerchargen gemacht werden. Da der Wasserzugabe immer Schwankungen aufgrund der Altsandeigenschaften wie Altsandfeuchte oder -temperatur überlagert sind, ist eine solche Aussage nicht für eine einzelne Charge möglich, sondern nur als statistische Auswertungen über einen gewissen Zeitraum.

Die statistische Auswertung der Gussfehler kann auch Hinweise auf den Zustand des Formstoffkreislaufs liefern. Eine Auswertung der Gussfehler nach Zahl und möglichen Fehlerursachen kann früh Hinweise auf Veränderungen im Formstoffkreislauf liefern. Ein Programm zur Durchführung solcher Analysen, das auf einer beschreibenden Darstellung der Gussfehler basiert, wurde erstellt und im Praxiseinsatz erprobt.

Es wird immer notwendig sein, regelmäßige Laborkontrollen des Formstoffs durchzuführen, wie z. B. Überprüfung der Aktivbentonitkonzentration nach der Methylenblaumethode, aber auch die Bestimmung der Sieblinie oder des Schlammstoffgehalts. Unter Nutzung der beschriebenen Kontrollverfahren kann die Frequenz dieser Prüfungen allerdings eventuell reduziert werden.



## 7 Literaturverzeichnis

- /1/ Chemische Sensoren heute und morgen  
Anforderungen, Fertigungstechniken, Entwicklungstrend  
Oehme, F. und 6 Mitautoren  
(Sensorik; Band 4)  
Renningen-Malmsheim : expert-Verlag 1994
- /2/ Keramische Gassensoren: Grundlagen, Aufbau, Anwendung  
Ullmann, H.  
Berlin : Akademie Verlag 1993
- /3/ Formstoffe und Formverfahren in der Gießereitechnik  
Bindernagel, I.  
VDG-Taschenbücher 12  
Düsseldorf : Gießerei-Verlag GmbH 1983
- /4/ Kontaktseminar Überwachung und Steuerung von tongebundenen Formstoffsystemen  
Düsseldorf, 1985
- /5/ Steuerung der Sandqualität bei modernen Formanlagen  
Levelink, H.; van den Berg, H; Frank, E.  
Gießerei 62 (1975) Nr. 5 S. 93-99
- /6/ Formstoffe und Formverfahren  
Flemming, E.; Tilch, W.  
Leipzig, Stuttgart : Dt. Verlag für Grundstoffindustrie 1993
- /7/ Taschenbuch der Gießereipraxis 1991  
Röhrig, K. (Hrsg.)  
Berlin : Fachverlag Thiele und Schön GmbH
- /8/ Entwicklung und Prüfung tongebundener Formstoffe in den letzten Jahren  
Brümmer, E.  
Gießerei 73 (1986) Nr. 13 S. 406-410
- /9/ Kontrolle und Steuerung der Formstoffqualität in der Fertigung tongebundener Formen  
Flemming, E.; Tilch, W.; Schuszter, T.  
Gießerei 78 (1991) Nr. 1 S. 18-23
- /10/ Die kastenbezogene Rücklaufsandsteuerung bei der Fa. Harzer Graugusswerke in Zorge  
Ohlmess, H.; Ernst, W.; Schmidt, Z.; Klitsch, K.  
Giesserei 85 (1998) Nr. 6 S. 47-53
- /11/ Möglichkeiten einer Prozesssteuerung bei der Aufbereitung von umlaufenden Formsandsystemen  
Berndt, H., Wetzlar  
Gießerei 72 (1985) Nr. 12 S. 351-359
- /12/ Vorlesung Bindersysteme  
Wojtas, H.-J.  
Gerhard-Mercator-Universität Duisburg

- /13/ Steuerung der Sandqualität bei modernen Formanlagen  
Mitteilung des Instituts für das Gießereiwesen TNO, Appeldorn/Holland  
Levelink, H. G.; van den Berg, H; Frank, E.  
Gießerei 62 (1975) Nr. 5 S. 93-99
- /14/ Tongebundene Formsande  
Hofmann, F.  
VDG-Taschenbücher 2  
Düsseldorf : Gießerei-Verlag GmbH 1975
- /15/ Handbuch der Gussfehler  
Formsandbeeinflussbare Fehler und deren Vermeidung  
Baier, J.; Köppen, M.  
Informationsschrift der Firma IKO-Erbslöh Industriemineralien und Kohlenstoffe GmbH & Co KG  
Marl, 1994
- /16/ Hofmann, F.; Satmer, F.  
Gießerei 68 (1981) Nr. 4 S. 81-85
- /17/ Formgrundstoffe - Vorkommen, Eigenschaften, Prüfung, Einsatzmöglichkeiten  
VDG-Taschenbücher 11  
Weiss, R.  
Düsseldorf : Gießerei-Verlag GmbH 1984
- /18/ VDG-Merkblatt P27  
Prüfung von Formgrundstoffen, Bestimmung der granulometrischen Kennwerte  
VDG-DOK, Düsseldorf
- /19/ VDG-Merkblatt P33  
Prüfung von tongebundenen Formstoffen, Bestimmung des Gehalts an Kohlenstoffträgern  
VDG-DOK, Düsseldorf
- /20/ VDG-Merkblatt P37  
Prüfung von tongebundenen Formstoffen, Bestimmung der Formbarkeit  
VDG-DOK, Düsseldorf
- /21/ VDG-Merkblatt P38  
Prüfung von tongebundenen Formstoffen, Bestimmung der Festigkeiten  
VDG-DOK, Düsseldorf
- /22/ Wasserentsalzung verbessert die Gussoberflächen  
Boenisch, D.  
Gießerei 66 (1979) Nr. 11 S. 334-344
- /23/ Patterson, W., Boenisch, D.  
Gießerei; techn. wiss. Beihefte (1958) Nr. 19, S. 995-1005
- /24/ VDG-Merkblatt P85  
Bestimmung von Glanzkohlenstoff  
VDG-DOK, Düsseldorf
- /25/ VDG-Merkblatt P26  
Prüfung von Formgrundstoffen, Bestimmung der stofflichen Eigenschaften  
VDG-DOK, Düsseldorf
- /26/ Gießerei-Lexikon  
Brunhuber, E.  
Berlin : Fachverlag Schiele & Schön GmbH 1994
- /27/ Die gussbezogene Formsandsteuerung zur Vergleichmäßigung des Sandhaushalts  
Ernst, W.; Ohlmess, H.  
Gießerei-Erfahrungsaustausch 7/99 (1999); S. 345-351

- /28/ Optimierung eines Sandsystems und Einführung einer vorbeugenden Formstoffsteuerung  
Wojtas, H.-J.; Rosenthal, M.  
Gießerei 83 (1996) Nr. 10 S. 14-19; Gießerei 83 (1996) Nr. 11 S. 25-29
- /29/ Aufbau von logistischen Informationssystemen zur Integration der Gussfehlererfassung in den betrieblichen Regelkreis  
Steinbauer, G.; Orths, K.  
Gießerei 71 (1984) Nr. 8 S. 313-318; Gießerei 71 (1984) Nr. 9 S. 362-367;  
Gießerei 71 (1984) Nr. 11 S. 440-448; Gießerei 71 (1984) Nr. 15 S. 582-587;  
Gießerei 71 (1984) Nr. 20 S. 790-795
- /30/ Patterson, W.; Boenisch, D.  
Gießerei, techn. wiss. Beihefte 13 (1961) 3, S 155-193
- /31/ Tilch, W.; Kraetsch, D.  
Gießereitechnik 32 (1986) 1, S11/14
- /32/ Störr, M., Ulrich, B.  
Gießereitechnik 30 (1984) 9, S. 284-289
- /33/ Bindernagel, J.; Nowacki, K.; Orths, K.  
Gießerei 57 (1970) 18, S. 65-69

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 : Regelkreise der Wasser- und Bentonitzugabe .....	2
Abb. 2 : Einfluss der Na-Aktivierung des Bentonits auf die Formstoffkennwerte /6/ .....	4
Abb. 3 : Einfluss des Schlammstoffgehaltes auf die Feuchtigkeitsempfindlichkeit des Formsandes /13/ ..	5
Abb. 4 : Einfluss des Binder- und Wassergehaltes auf die Gründruckfestigkeit /14/ .....	6
Abb. 5 : Einfluss des Wassergehaltes auf die wichtigsten Formstoffeigenschaften /9/ .....	6
Abb. 6 : Die durch das Wasser eingeschleppten Elektrolyte sind für den Nasszugfestigkeitsabfall verantwortlich (5 kg Formsand mit 6 Gew.-Teilen Natriumbentonit) /22/ .....	7
Abb. 7 : Die Gründruck- und Grünzugfestigkeit lassen eine Schädigung durch Salze im Formstoff nicht erkennen /22/ .....	7
Abb. 8 : Einfluss der Mischzeit auf die Schüttdichte (und damit auf den Aufbereitungsgrad) /3/ .....	8
Abb. 9 : Abhängigkeit der Gasdurchlässigkeit von der Aufbereitungsintensität /6/ .....	9
Abb. 10 : Abhängigkeit der Gasdurchlässigkeit von der Verdichtung /8/ .....	9
Abb. 11 : Thermogravimetrie von Tonmineralien /12/ .....	11
Abb. 12 : Moldability-Controller /14/ .....	11
Abb. 13 : Gerät zur Glanzkohlenstoffbestimmung /24/ .....	12
Abb. 14 : Näherungsweise Zusammenhang zwischen mittlerer Korngröße und AFS-Feinheitsnummer /6/, nach /17/ .....	13
Abb. 15 : Zusammenhang zwischen Gasdurchlässigkeit und wirklicher spezifischer Oberfläche für verschiedene Quarzsande /17/ .....	13
Abb. 16 : Vorrichtung zur Bestimmung der Schüttdichte /20/ .....	14
Abb. 17 : Druckfestigkeitsprüfung (schematisch) /21/ .....	15
Abb. 18 : Grünzugfestigkeitsprüfung (schematisch) /21/ .....	15
Abb. 19 : Scherfestigkeitsprüfung (schematisch) /21/ .....	16
Abb. 20 : Doppelquer-Schervorrichtung (schematisch) /21/ .....	16
Abb. 21 : Spaltfestigkeitsprüfung (schematisch) /21/ .....	16
Abb. 22 : Nasszugfestigkeitsprüfung (schematisch) /21/ .....	17
Abb. 23 : Abhängigkeit der Gasdurchlässigkeit von der mittleren Korngröße /14/ .....	17
Abb. 24 : Prüfverfahren zur Messung der Formstoffplastizität /8/ .....	18
Abb. 25 : Prüfverfahren zur Messung der Ausstoßkraft /8/ .....	18
Abb. 26 : Ausstoßkraft und Gründruckfestigkeit bei Betriebssanden unterschiedlicher Feuchte und Verdichtung /8/ .....	19
Abb. 27 : Abhängigkeit zwischen Druckfestigkeit und Ausstoßkraft bei 52 Betriebssanden /8/ .....	19
Abb. 28 : Abhängigkeit von Feuchtemesseinrichtungen von der Schüttdichte des Formstoffs, Beschreibung der Versuchsdurchführung siehe Kap. 6.5.1.1 .....	21
Abb. 29 : Steuerungsdiagramm für die Bentonitzugabe Druckfestigkeit 20 N/cm <sup>2</sup> bei 8,8 kg/dm <sup>3</sup> Schüttgewicht /13/ .....	24
Abb. 30 : Einfluss der Formstoffzusammensetzung auf den formgerechten Wassergehalt /6/ .....	26
Abb. 31 : Regelschema Formstoff-Feuchte anhand der Verdichtbarkeit .....	27
Abb. 32 : Regelschema Bentonitzugabe anhand der Verdichtbarkeit .....	28
Abb. 33 : Prinzipdarstellung des neuentwickelten Verdichtbarkeitsmessgerätes .....	29
Abb. 34 : Schema eines Fuzzy-Reglers .....	30
Abb. 35 : Eingabemaske des Expertensystems .....	31
Abb. 36 : Analyse der eingegebenen Gussfehlermerkmale .....	32
Abb. 37 : Vorschläge für Abhilfemaßnahmen .....	33
Abb. 38 : Weitere Erläuterungen zu den Fehlerursachen und Abhilfemaßnahmen .....	33
Abb. 39 : Ausgabe der Primär- und Sekundärmaßnahmen .....	34
Abb. 40 : Beispieldruck einer Auswertung .....	34
Abb. 41 : Einflüsse auf ein Formstoffelement bei der Simulation .....	35
Abb. 42 : Aufteilung des Formstoffkreislaufs in finite Elemente am Beispiel der Fa. Georg Fischer .....	36
Abb. 43 : Anlagenschaubild mit Momentaufnahme eines Simulationslaufs .....	36
Abb. 44 : Produktionsdaten als Basis der Simulation .....	37
Abb. 45 : Einzeldarstellung einer Zelle (Formstoffeinheit) während der Simulation .....	38
Abb. 46 : Formstoffkreislauf Woeste .....	39
Abb. 47 : Formstoffaufbereitung Georg Fischer AM 409 .....	40
Abb. 48 : Sandaufbereitung AE Goetze .....	41
Abb. 49 : Anzeige der Feuchtemessgeräte für verschiedene Formstoff-Verdichtungen .....	44
Abb. 50 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Bentonit D, unverdichtet und verdichtet, für beide Feuchtemessgeräte .....	47

Abb. 51 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Bentonit E, unverdichtet und verdichtet, für beide Feuchtemessgeräte .....	47
Abb. 52 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Bentonit SR, unverdichtet und verdichtet, für beide Feuchtemessgeräte .....	48
Abb. 53 : Anzeige des Feuchtemessgerätes SMG bei Zugabe von Kochsalz.....	50
Abb. 54 : Anzeige des Feuchtemessgerätes Ludwig bei Zugabe von Kochsalz.....	50
Abb. 55 :Vergleich Verdichtbarkeit Eigenentwicklung / Vergleichsgerät .....	52
Abb. 56 :Vergleich Scherfestigkeit Eigenentwicklung / Vergleichsgerät .....	52
Abb. 57 : Häufigkeitsverteilung (Streuung) aller durchgeführten Messungen, bezogen auf den Mittelwert jeder Charge.....	53
Abb. 58 : Vergleich Dichte des Prüfkörpers Eigenentwicklung / Vergleichsgerät.....	54
Abb. 59 : Gegenüberstellung Verdichtbarkeit/Dichte Eigenentwicklung .....	54
Abb. 60 : Gegenüberstellung Verdichtbarkeit/Dichte Vergleichsgerät GF .....	54
Abb. 61 : Verdichtbarkeit nach Anlegen eines Vordrucks von 1 Bar.....	55
Abb. 62 : Darstellung der Verdichtbarkeit über der Formstoff-Feuchte.....	58
Abb. 63 : Darstellung der Verdichtbarkeit über der Bentonitzugabe, für verschiedene Formstoff-Feuchten	58
Abb. 64 : Scherfestigkeit für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben, gemessen mit dem Eigenbau-Formstoffprüfgerät .....	59
Abb. 65 : Scherfestigkeit für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben, gemessen mit dem Labor-Vergleichsgerät .....	59
Abb. 66 : Schüttdichte für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben .....	60
Abb. 67 : Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Schüttdichte .....	60
Abb. 68 : Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit und Schüttdichte .....	61
Abb. 69 : Zusammenhang zwischen Formstoff-Feuchte und Schüttdichte .....	61
Abb. 70 : Darstellung der Verdichtbarkeit über der Formstoff-Feuchte.....	62
Abb. 71 : Darstellung der Verdichtbarkeit über der Bentonitzugabe, für verschiedene Formstoff-Feuchten	62
Abb. 72 : Scherfestigkeit für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben, gemessen mit dem Eigenbau-Formstoffprüfgerät .....	63
Abb. 73 : Scherfestigkeit für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben, gemessen mit dem Labor-Vergleichsgerät .....	63
Abb. 74 : Schüttdichte für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben .....	64
Abb. 75 : Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Schüttdichte .....	64
Abb. 76 : Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit und Schüttdichte .....	65
Abb. 77 : Zusammenhang zwischen Formstoff-Feuchte und Schüttdichte .....	65
Abb. 78 : Darstellung der Verdichtbarkeit über der Formstoff-Feuchte.....	66
Abb. 79 : Darstellung der Verdichtbarkeit über der Bentonitzugabe, für verschiedene Formstoff-Feuchten	66
Abb. 80 : Scherfestigkeit für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben, gemessen mit dem Eigenbau-Formstoffprüfgerät .....	67
Abb. 81 : Scherfestigkeit für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben, gemessen mit dem Labor-Vergleichsgerät .....	67
Abb. 82 : Schüttdichte für verschiedene Formstoff-Feuchten und Bentonitzugaben .....	68
Abb. 83 : Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Schüttdichte .....	68
Abb. 84 : Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit und Schüttdichte .....	69
Abb. 85 : Zusammenhang zwischen Formstoff-Feuchte und Schüttdichte .....	69
Abb. 86 : Messpositionen während der Praxisversuche .....	71
Abb. 87 : Vergleich der einzelnen Versuchstage.....	72
Abb. 88 : Abhängigkeit von der Formstofftemperatur .....	72
Abb. 89 : Abhängigkeit von der Temperatur des Formstoffs an der Auspackstelle .....	73
Abb. 90 : Abhängigkeit von der Bentonitzugabe (Zellradschleuse %).....	73
Abb. 91 : Häufigkeitsverteilung der Verdichtbarkeiten im Altsand und im Fertigsand .....	74
Abb. 92 : Fuzzifizierung der Verdichtbarkeit.....	75
Abb. 93 : Fuzzifizierung der Formstofftemperatur.....	75
Abb. 94 : Fuzzifizierung der Wasserzugabemenge .....	76
Abb. 95 : Kennlinienfeld des Fuzzy-Reglers.....	77
Abb. 96 : Vergleich des Fuzzy-Reglers mit einer konventionellen Regelung.....	78
Abb. 97 : Kennlinie Wasserdosierzeit / Wassermenge.....	79
Abb. 98 : Zusammenhang zwischen Verdichtbarkeit und Wasserzugabe, aufgeschlüsselt nach Versuchstagen.....	80
Abb. 99 : Altsand-Verdichtbarkeit und Wasserzugabe bei verschiedenen Formstofftemperaturen .....	80
Abb. 100 : Kennlinien Verdichtbarkeit/Wasserzugabe für unterschiedliche Temperaturbereiche.....	81

Abb. 101 : Ist-Wasserzugabe für unterschiedliche Altsand-Verdichtbarkeiten und -Feuchten .....	81
Abb. 102 : Altsand-Verdichtbarkeit und Wasserzugabe, und die resultierenden Fertigsand- Verdichtbarkeiten .....	82
Abb. 103 : Bildschirmmaske ‚Modellplattendatei‘ .....	84
Abb. 104 : Bildschirmmaske ‚Manuelle Korrekturen‘ .....	85
Abb. 105 : Eingabemaske ‚Produktionsplan‘ .....	86
Abb. 106 : Eingabe der Produktionsdaten einer Modellplatte .....	86
Abb. 107 : Steuerungsanweisung .....	87
Abb. 108 : Anordnung des Verdichtbarkeitsmessgerätes am Mischer .....	89
Abb. 109 : Kennlinienfeld der Fuzzy-Regelung bei den ersten Versuchen .....	91
Abb. 110 : Kennlinienfeld der Fuzzy-Regelung nach der Einführungsphase .....	91
Abb. 111 : Einrichtung zur Auflockerung des Formstoffs bei der Probenahme .....	92
Abb. 112 : Anordnung des Verdichtbarkeitsmessgerätes zur Überwachung des Fertigsands .....	93
Abb. 113 : Aufschreibung einer Versuchsreihe, Gegenüberstellung von Altsand- und Fertigsanddaten ..	94
Abb. 114 : Verlauf der Aktivbentonitkonzentration .....	95
Abb. 115 : Abhängigkeit zwischen Aktivbentonitkonzentration und mittlerer Wasserdosiermenge, an 6 aufeinanderfolgenden Produktionstagen .....	96
Abb. 116 : Vorgehensweise bei der Einführung des neuen Steuerungskonzepts .....	98
Abb. 117 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Fa. Ludwig, unverdichtet .....	115
Abb. 118 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Fa. Ludwig, verdichtet um 10% .....	115
Abb. 119 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Fa. SMG, unverdichtet .....	116
Abb. 120 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Fa. SMG, verdichtet um 10% .....	116
Abb. 121 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Fa. Ludwig, unverdichtet, rechnerische Korrektur anhand der Schüttdichte .....	117
Abb. 122 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Fa. Ludwig, verdichtet um 10%, rechnerische Korrektur anhand der Schüttdichte .....	117
Abb. 123 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Fa. SMG, unverdichtet, rechnerische Korrektur anhand der Schüttdichte .....	118
Abb. 124 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Fa. SMG, verdichtet um 10%, rechnerische Korrektur anhand der Schüttdichte .....	118

## 9 Tabellenverzeichnis

Tab. 1 : Physikalische Eigenschaften verschiedener Formgrundstoffe .....	3
Tab. 2 : Ergebnisse Feuchtemessgerät Fa. Ludwig (Mikrowellenmessverfahren) .....	43
Tab. 3 : Ergebnisse Feuchtemessgerät Fa. SMG (Leitfähigkeitsmessverfahren) .....	43
Tab. 4 : Feuchtemessungen bei unterschiedlichen Bentonit-Sorten .....	45
Tab. 5 : Feuchtemessungen bei unterschiedlichen Bentonit-Sorten, rechnerische Korrektur anhand der Schüttdichte .....	45
Tab. 6 : Einfluss der Zugabe von Kochsalz auf die Bestimmung der Formstoff-Feuchte .....	49
Tab. 7 : Zusammenfassung der Ergebnisse Betriebsformstoffuntersuchungen .....	57
Tab. 8 : Regelbasis des Fuzzy-Reglers .....	76
Tab. 9 : Erfüllte Regeln für die Beispieldaten .....	76
Tab. 10 : Aktivbentonitgehalt .....	95
Tab. 11 : Gegenüberstellung Wasserbedarf/Aktivbentonitkonzentration .....	96
Tab. 12 : Gegenüberstellung der beteiligten Gießereien .....	114
Tab. 13 : Zusammenfassung der Ergebnisse der Prüfmischungen .....	119
Tab. 14 : Gegenüberstellung der gemessenen Verdichtbarkeiten Laborprüfgerät und Betriebsmessgerät 120	
Tab. 15 : Gegenüberstellung der gemessenen Scherfestigkeiten Laborprüfgerät und Betriebsmessgerät 121	
Tab. 16 : Gegenüberstellung der gemessenen Prüfkörperdichten Laborprüfgerät und neuentwickeltes Betriebsmessgerät .....	122
Tab. 17 : Gegenüberstellung der gemessenen Verdichtbarkeiten und Prüfkörperdichten, für das neuentwickeltes Betriebsmessgerät .....	123
Tab. 18 : Gegenüberstellung der gemessenen Verdichtbarkeiten und Prüfkörperdichten, für das Laborprüfgerät GF .....	124
Tab. 19 : Gegenüberstellung der nach Anlegen eines Vordrucks von 1 Bar gemessenen Verdichtbarkeiten des Betriebsmessgerätes mit den Verdichtbarkeiten des Vergleichsmessgerätes GF .....	125
Tab. 20 : Datenaufschreibung Tag 7 .....	126
Tab. 21 : Datenaufschreibung Tag 8 .....	127
Tab. 22 : Datenaufschreibung Tag 9 .....	128
Tab. 23 : Datenaufschreibung Tag 10 .....	129

## Anhang



Anlage 1 : Anlagen- und Produktdaten der beteiligten Gießereien

	Prio.	Parameter	Woeste	Georg Fischer	AE Goetze
<b>Rohstoffe</b>					
<b>Bentonit</b>					
Bezeichnung			Süd-Chemie GEKO-P	IKO-Bond E -GFM-	IKO-Bond E
Hersteller-Datenblatt			Qualitätszertifikat liegt vor	Qualitätszertifikat liegt vor	
Montmorillonitgehalt	1	Wareneingang			70 - 75 %
MB-Wert	1	Wareneingang	350-410 mg/g	380 mg/g	
Ionen austauschvermögen	1	Wareneingang			
Aktivierung	1	Wareneingang			Soda
Restsodagehalt		Wareneingang			
Restfeuchte		Wareneingang	1,8 - 2,0 %	10,50%	
Dosiermenge	1	Online	0,56% mit - 0,2% ohne GKB-Gemisch	ermittelt über vorbeugende Sandsteuerung	0,3 % auf 1400kg=4,2kg
Dosiergenauigkeit	3	Prüfung	Wägung auf Meßdosen, +/- 100 g	Zellradtschleuse, Einstellung in %, Kalibrierkurve liegt vor	Wägung von Hand
Anmerkungen				Süddeutscher Bentonit, zusätzlich griechischer Bentonit	
<b>Glanzkohlenstoffbildner</b>					
Bezeichnung			Polybenton 20 B 60 Woe	IKO-NB 50 GFM	kein Einsatz von Glanzkohlenstoffbildnern
Hersteller-Datenblatt		Wareneingang	Qualitätszertifikat liegt vor	Qualitätszertifikat liegt vor	
Aschegehalt		Wareneingang	54%	47,50%	-
Wassergehalt		Wareneingang	7,60%	7,60%	-
Bezeichnung		Wareneingang	Antrapur QB 460 WOV	Antrapur 135 GFM	-
Hersteller-Datenblatt		Wareneingang	Qualitätszertifikat liegt vor	Qualitätszertifikat liegt vor	-
Aschegehalt		Wareneingang	56%	37,10%	-
Wassergehalt		Wareneingang	8,60%	7%	-
Zusammensetzung		Wareneingang	40% Schwarz (Kohlenstoffe, 60% Weiß (Bentonit)	60 % Kohlenwasserstoffe, 40 % Bentonit	-
Kohlenstaub		Wareneingang	kein reiner Kohlenstaubzusatz	kein reiner Kohlenstaubzusatz	-
Stärke-Quellbinder		Wareneingang	keiner	keiner	-
Dosiermenge	1	Online	0,25%		-
Dosiergenauigkeit	3	Prüfung	Wägung auf Meßdosen, +/- 100 g	Zellradtschleuse, Einstellung in %, Kalibrierkurve liegt vor	-

	Prio.	Parameter	Woeste	Georg Fischer	AE Goetze
<b>Neusand</b>			keine Neusandzugabe	H 33 / F 33, bzw. geraspelter Kernbruch	Nieselsteiner Grube (Natarsand)
Korngrößenverteilung	3	Wareneingang	-	Korngrößenverteilung liegt vor	AFS 100 (Korngrößen-verteilung liegt vor)
Kornform		Wareneingang	-		splittrig
Porosität		Wareneingang	-		
Zugabemengen	1	Online	-		3% von 1400 kg = 42 kg
Dosiergenauigkeit	3	Prüfung	-	Vibrationsrinne, konstant 2.052 t/h, läuft während der Chargierzeit des Mischers	von Hand
<b>Formsand</b>					
Korngrößenverteilung	2	Offline	Aufschreibung	Aufschreibung	AFS 100 (Korngrößenverteilung liegt vor)
Feuchte	1	Online	Aufschreibung	3,30%	2,8 - 3,8 %
Aktiv-Bentonitgehalt	1	Offline	Aufschreibung	ca. 9,5 %	
als Methylenblauwert	1	Offline	Aufschreibung	MB : 8,3	MB : 2,6 - 3,3
GKB-Gehalt	1	Offline	Aufschreibung	Aufschreibung	-
Schlammstoffe	2	Offline	Aufschreibung	Aufschreibung	10,3 - 12,7 %
Inerte Bestandteile				0 - 3 %	
Temperatur	1	Online	SMS/Lippke (steigt bis auf 80°C bei Schichtende)		ca 30°
Verdichtbarkeit				Aufschreibung	
Naßzugfestigkeit				Aufschreibung	Aufschreibung
Gründruckfestigkeit				Aufschreibung	Aufschreibung
Gasdurchlässigkeit				Aufschreibung	Aufschreibung
Schüttlichte				Aufschreibung	
Glühverlust				Aufschreibung	
Schamottisierungsgrad				Aufschreibung	
Fließbarkeit					Aufschreibung
Trockendruckfestigkeit					Aufschreibung
Gründruckfestigkeit					Aufschreibung
Umlaufmenge				359 t	
Max. Sanddurchsatz				215 t/h bei normalem Takt	
Umlaufzeit				1,5h bei normalem Takt	3-3,5 Umläufer/Tag

	Prio.	Parameter	Woeste	Georg Fischer	AE Goetze
<b>Altsandbunker</b>					
Größe/Anzahl		Anlage	2 Stk, zusammen 44 t	Zwischenbunker 15 t, 3 Umlaufsbunker mit zus. 60t, 2 Fertigsandbunker mit zus. 40 t	
Verweilzeit	2	Online	1,1h max	ca 12 min	8 h
Sandumläufe					
Bunkerstrategie		Anlage	Umschaltung, manuelle Abreinigung	Sequentielle Füllung, gleichzeitige Entnahme,	
Absaugung		Anlage			
Klima			Bänder abgesaugt		Bänder offen, Innenraum von 80°C Aufschlag 50°C
Temperaturänderung					
Austrocknung				Aufschreibung des Feuchteverlaufs über die Sandaufbereitung liegt vor	
<b>Wasserzugabe</b>					
Zugabemenge	1	Online	Gesteuert über Altsandfeuchte (Lippke)	gesteuert über Moldability-Controller	Altsandfeuchteabhängig (Michenfelder)
Dosiergenauigkeit	3	Prüfung	Volumetrisch/Impulzzählung		Volumetrisch 0,5l/Impuls
pH-Wert	2	Prüfung	Brunnen 1 : 7,0 Brunnen 2 : 6,98	Brunnenwasser : 7,9 Industriewasser : 7,8	7 - 8 (Stadtwasser)
			Stadtwasser : 7,31	Stadtwasser : 7,8	
Leitfähigkeit		Prüfung	Brunnen 1 : 0,89 mS/cm Brunnen 2 : 0,87 mS/cm	Brunnenwasser : 1,4 mS/cm Industriewasser : 0,6 mS/cm	
			Stadtwasser : 0,45 mS/cm	Stadtwasser : 0,74 mS/cm	
Salzgehalt - Ca	2	Prüfung	Brunnen 1 : 98 mg/l Brunnen 2 : 90 mg/l	Brunnenwasser : 260 mg/l Industriewasser : 128 mg/l	50 mg/l
			Stadtwasser : 38 mg/l	Stadtwasser : 96 mg/l	
Salzgehalt - Na	2	Prüfung	Brunnen 1 : 52 mg/l Brunnen 2 : 60 mg/l	Brunnenwasser : 63 mg/l Industriewasser : 7,9 mg/l	
			Stadtwasser : 43 mg/l	Stadtwasser : 61 mg/l	
Salzgehalt - Chlorid	2	Prüfung	Brunnen 1 : 135 mg/l Brunnen 2 : 105 mg/l	Brunnenwasser : 273 mg/l Industriewasser : 28 mg/l	
			Stadtwasser : 38 mg/l	Stadtwasser : 109 mg/l	
Salzgehalt - Sulfat	2	Prüfung	Brunnen 1 : 73 mg/l Brunnen 2 : 77 mg/l	Brunnenwasser : 149 mg/l Industriewasser : 66 mg/l	
			Stadtwasser : 43 mg/l	Stadtwasser : 76 mg/l	

	Prio.	Parameter	Woeste	Georg Fischer	AE Goetze
<b>Mischer</b>					
Hersteller			Giromixer		
Anmerkungen				1 Trockenmischer, 2 Fertigsandmischer	3 Stk
Wirkprinzip	2	Anlage	Wirbler, Schnelllaufend	Tellermischer mit Kollergang	Kollergang
Anzahl Koller		Anlage	-	-	2
Anzahl Wirbler		Anlage	2	-	-
Mischzeit	1	Online	108 sek	kontinuierlich	3,5 - 4 min
Gattierung	2	Prüfung	2,2t		97 % Altsand 3 % Neusand 0,3 % Bentonit
Formstofftemperatur	1	Online		< 40°C	40 °C
Aufbereitungsintensität	2	Anlage			ca. 10 % ??
Drehzahl	2	Anlage			25 - 30/min
Stromaufnahme	1	Online	Alle Motoren 75 kW Nennleistung		80 A bei Vollast von 1400kg
Zugabezeitpunkte	2	Online	Zugabe Bentonit/GKB 4 sek nach Mischungsstart, dann Wasserzugabe (ca 10 sek)		Altsand + Bentonit vor Mischstart, Neusand und Wasser während des Mischprozesses
<b>Formanlage</b>					
Wirkprinzip		Anlage	Disa	Beurteilt wird Anlage 409	
Preßdruck	1	Online	Pressen	Rüttelpreß	Rüttelpreß
Preßzeit	1	Online	25 to	-	43 Bar konstant
Rüttelamplitude	1	Online/Anlage	-	-	0,5 sek
Rüttelfrequenz	1	Online/Anlage	-	-	-
Rüttelzeit	1	Online	-	-	-
Formstofflagerzeit	2	Online	10 min		10 min (Sand für 4 Stapel)
Ballengröße				970*700*320/320 mm	
Theor. Leistung				330 Kasten/h bei Normaltakt, 186 Kasten/h bei verlangsamten Takt	
Anmerkungen					mindestens 30% Überlaufsand

	Prio.	Parameter	Woeste	Georg Fischer	AE Goetze
<b>Kerne</b>					
Bindersystem			Hotbox	Coldbox	
Zugabemengen	1	Steuerung	35 - 40 % Kernanteile		-
Korngrößenverteilung	3	Offline	F33 - Wareneingangskontrolle liegt vor		-
Bindergehalt	1	Steuerung	1,9 - 2,2% Harz, 0,45-0,5 % Härter, 0,15-0,25% Conserver (Partisal Scheuring)	Binder/Härter 0,75%/0,75%	-
Bindersystem			Croning	CO2	
Zugabemengen	1	Steuerung	60 - 65 % Kernanteil, mittlere Korngröße 20 t/Monat, feine Korngröße 90 t/Monat (für alle Formanlagen)	Binderanteil 3,3%	-
Korngrößenverteilung	3	Offline			
Bindergehalt	1	Steuerung			-
<b>Gießstation</b>					
Gußwerkstoff	1	Anlage/Online	GTW	GGG	GG/GG legiert / GGG
Gießtemperatur	3	Online	1440-1460°C	1400-1430°C	1400-1400°C
Traubengewicht	1	Steuerung	8-18 kg, Mittel 11,2 kg	90-135 kg/Kasten	13-21 kg
Formstoff-Guß-Verhältnis	1	Steuerung	dünnwandig, Fittings im Gewichtsbereich 15g - 1,8 kg, meist im Bereich 100-400g		7/1 - 8/1
Gußstückmodul		Steuerung			
Kernintensität	2	Steuerung			-
Anmerkungen					Stapel besteht aus 19 Formen, davon 17 Nutzformen

	Prio.	Parameter	Woeste	Georg Fischer	AE Goetze
<b>Abkühlstrecke</b>					
Abkühlzeit	2	Online	60 Ballen, 12-20 min	65 - 120 min	5 min Minimum, 15-20min im Mittel
Abkühlbedingungen		Online			
Kastengebunden/Kastenlos		Anlage	Kastenlos	kastengebunden	kastengebunden
Formstoff/Guß-Verhältnis		Steuerung			7/1 - 8/1
Bentonit-Totbrand	1	Berechnet			
Oolithisierung	1	Berechnet			
GKB-Verlust	1	Berechnet	-		-
<b>Auspackstelle</b>					
Mech. Belastung		Anlage	Rotationstrommel/Vibrationstrommel	mech. Ausdrücken des Ballens, Rüttelfrost	Rüttelstation/Polygonsieb
Staubaustrag	1	Prüfung	Staub wird zurückgeführt	Staub wird zurückgeführt	
Knollenaustrag	1	Prüfung			
Sandreste am Guß		Prüfung	gering		< 5 %
Auspacktemperatur		Online	800°C, meist aber darunter		< 600°C
<b>Sandkühler</b>					
Sandbefeuchtung	1	Offline/Online	Mixcoolair, 32 UPM	Homo-Trommel	Aufschlag Altsandband
			Brunnenwasser für Auspaktrommel und Mixcoolair, Stadtwasser für Mischer, Daten siehe Wasserzugabe	Nur Einsatz von Industrierwasser, geplant ist Einsatz von Zisternen/ Regenwasser, Daten siehe Wasserzugabe	
pH-Wert Wasser	2	Prüfung	wird analysiert		7-8
Salzgehalt Wasser	2	Prüfung			50 mg Ca/l
Verlust Schlämstoffe	2	Offline			
Sandtemperatur	1	Online			80°C
Durchsatzmengen		Online			
<b>Altsandtransport</b>					
Mech. Belastung		Anlage			
Klima		Online			offene Bandführung
Verweilzeit		Online			
Absaugung		Anlage			

Tab. 12 : Gegenüberstellung der beteiligten Gießereien

Anlage 2 : Einfluß der Bentonitsorte auf die Anzeige der Feuchtemessgeräte

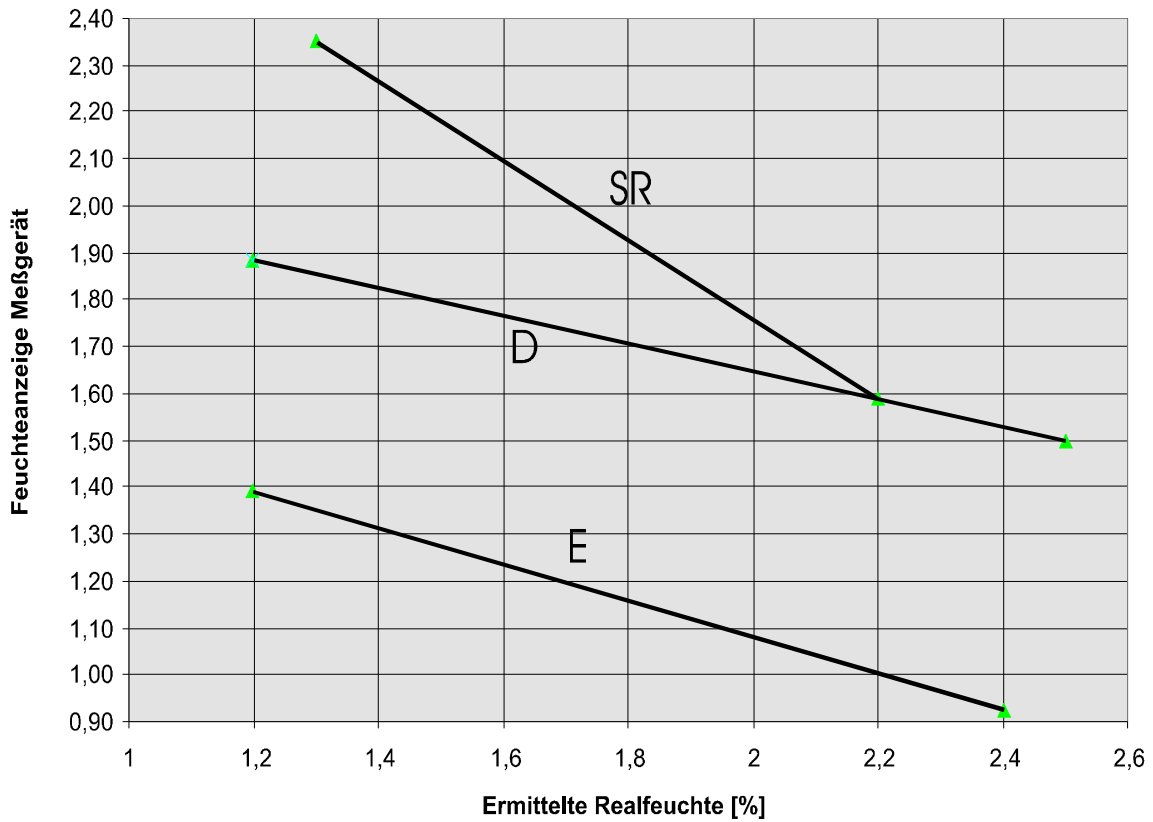


Abb. 117 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Fa. Ludwig, unverdichtet

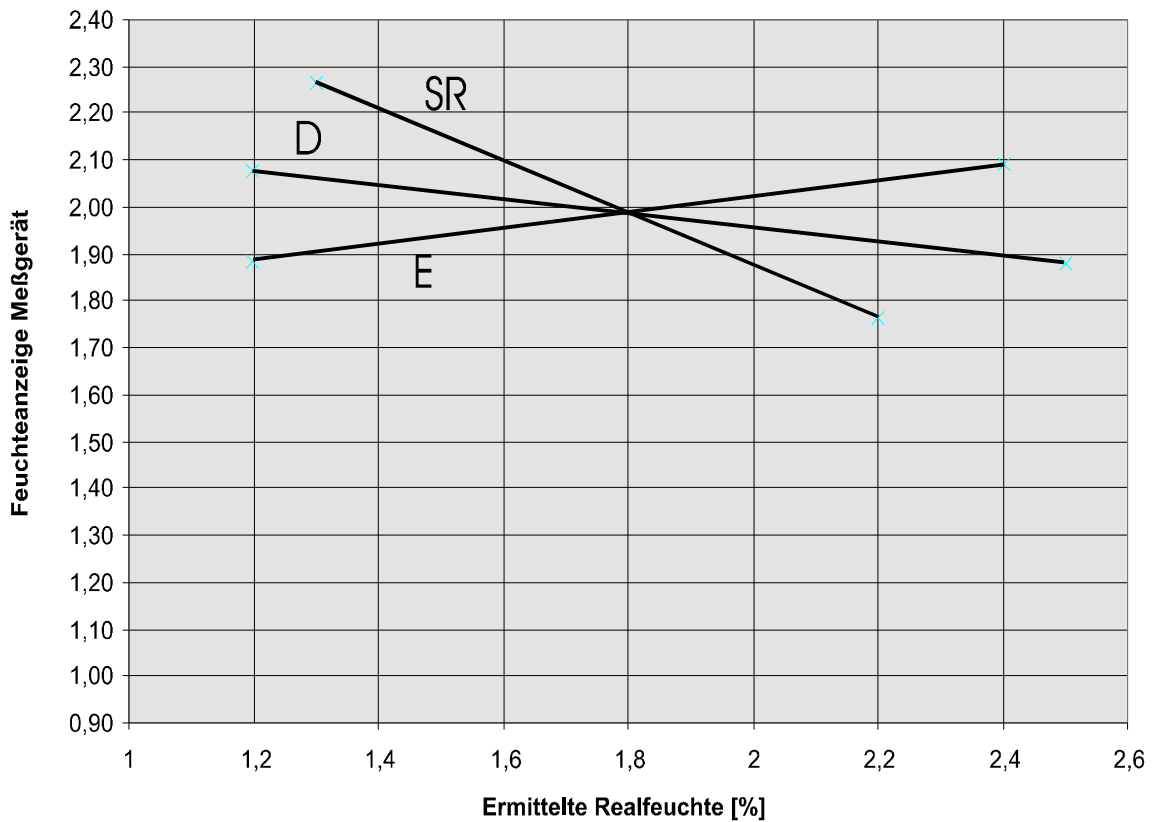


Abb. 118 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Fa. Ludwig, verdichtet um 10%

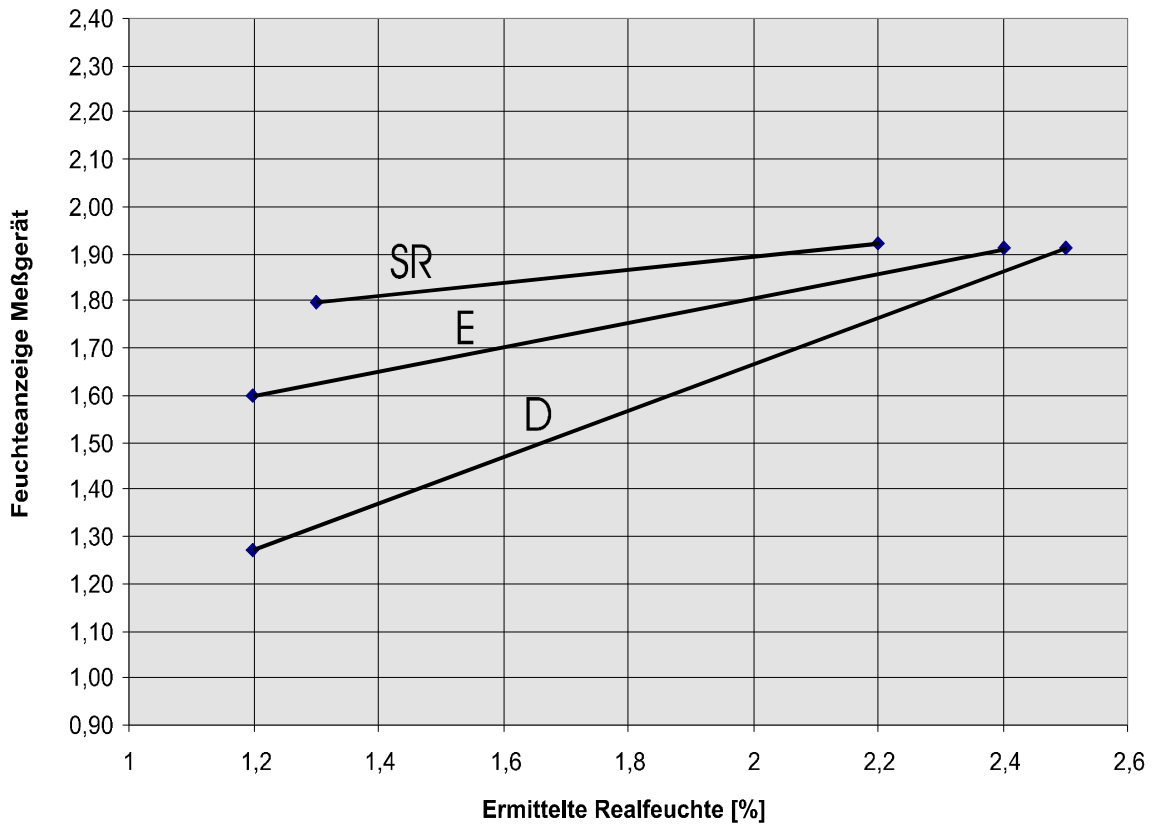


Abb. 119 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Fa. SMG, unverdichtet

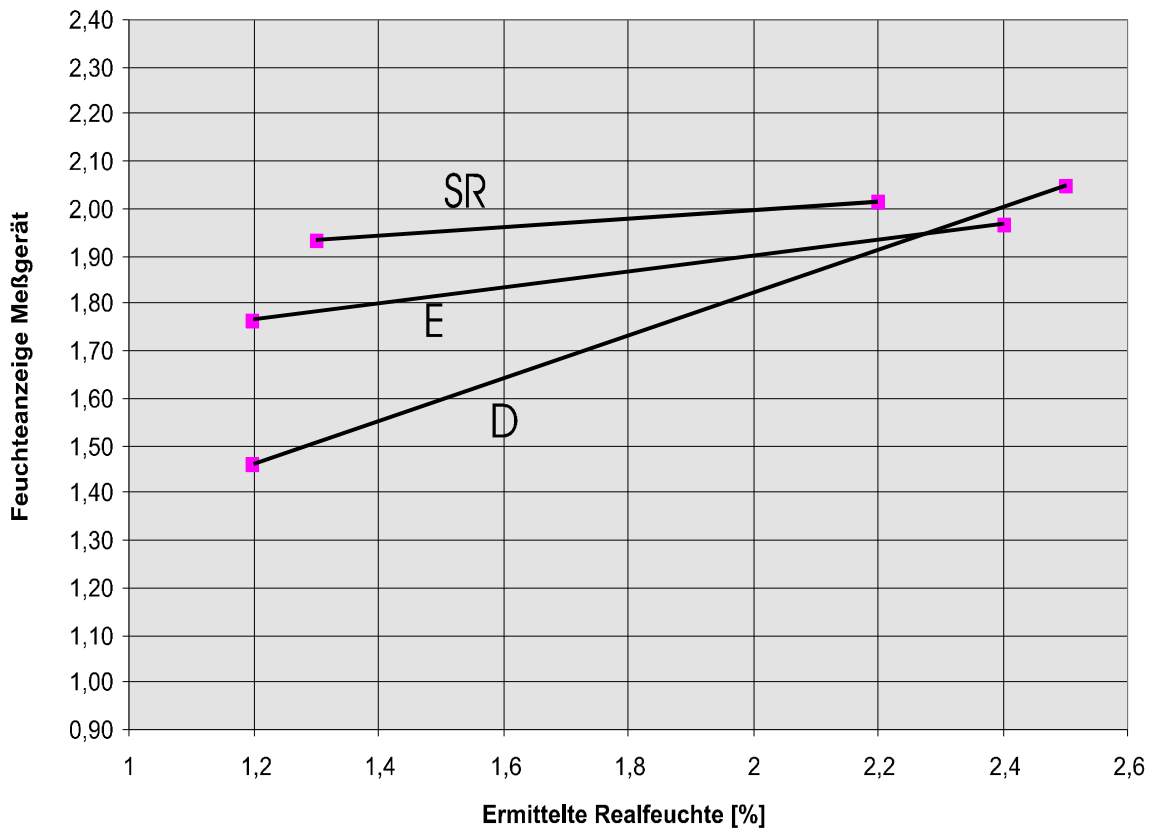


Abb. 120 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Fa. SMG, verdichtet um 10%



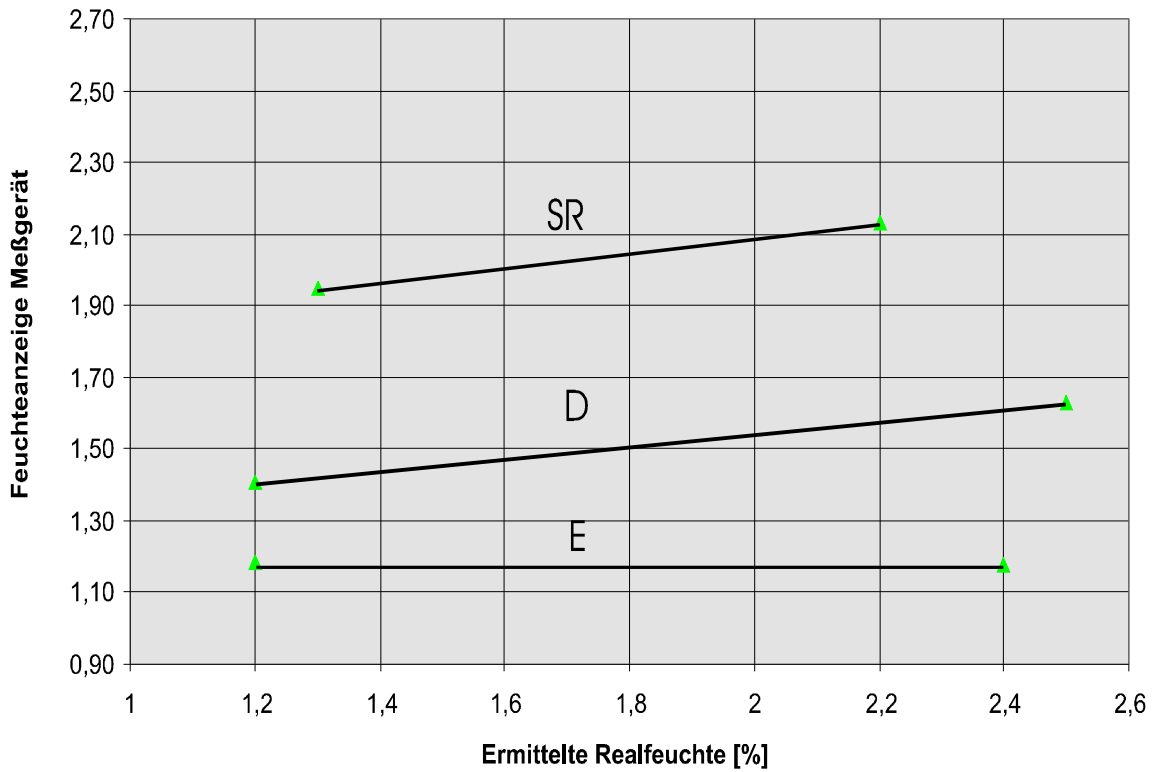


Abb. 121 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Fa. Ludwig, unverdichtet, rechnerische Korrektur anhand der Schüttdichte

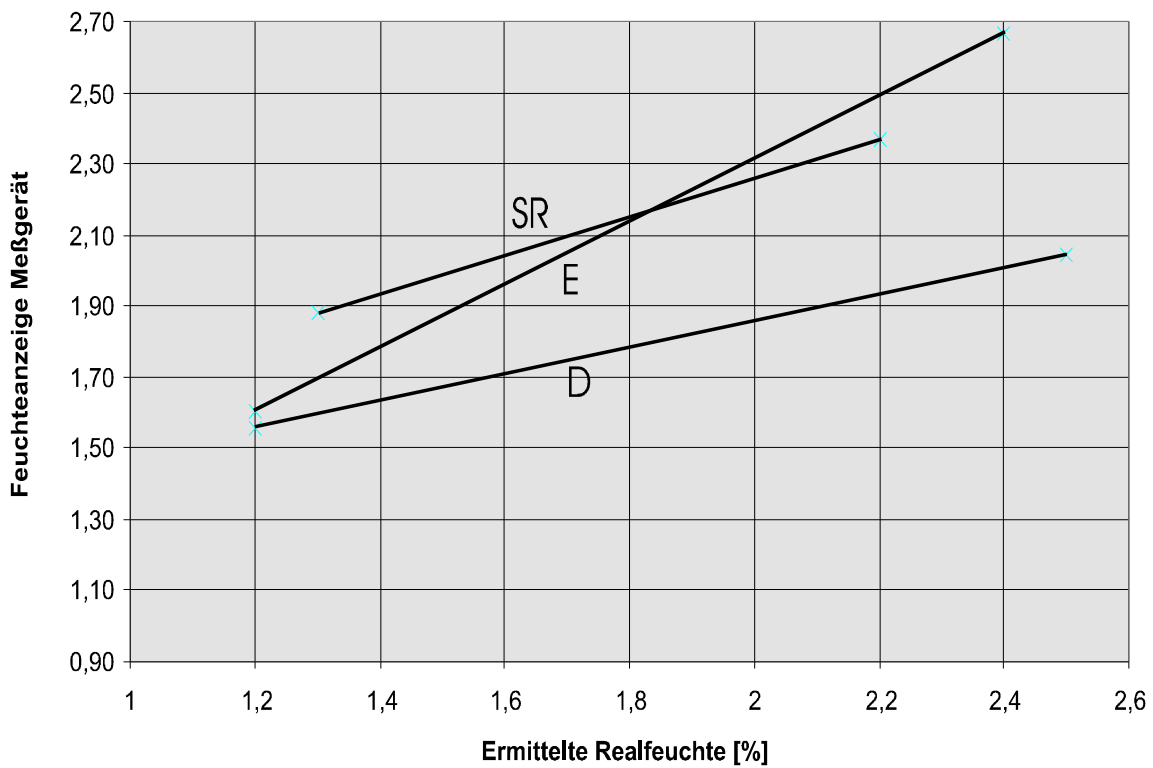


Abb. 122 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Fa. Ludwig, verdichtet um 10%, rechnerische Korrektur anhand der Schüttdichte

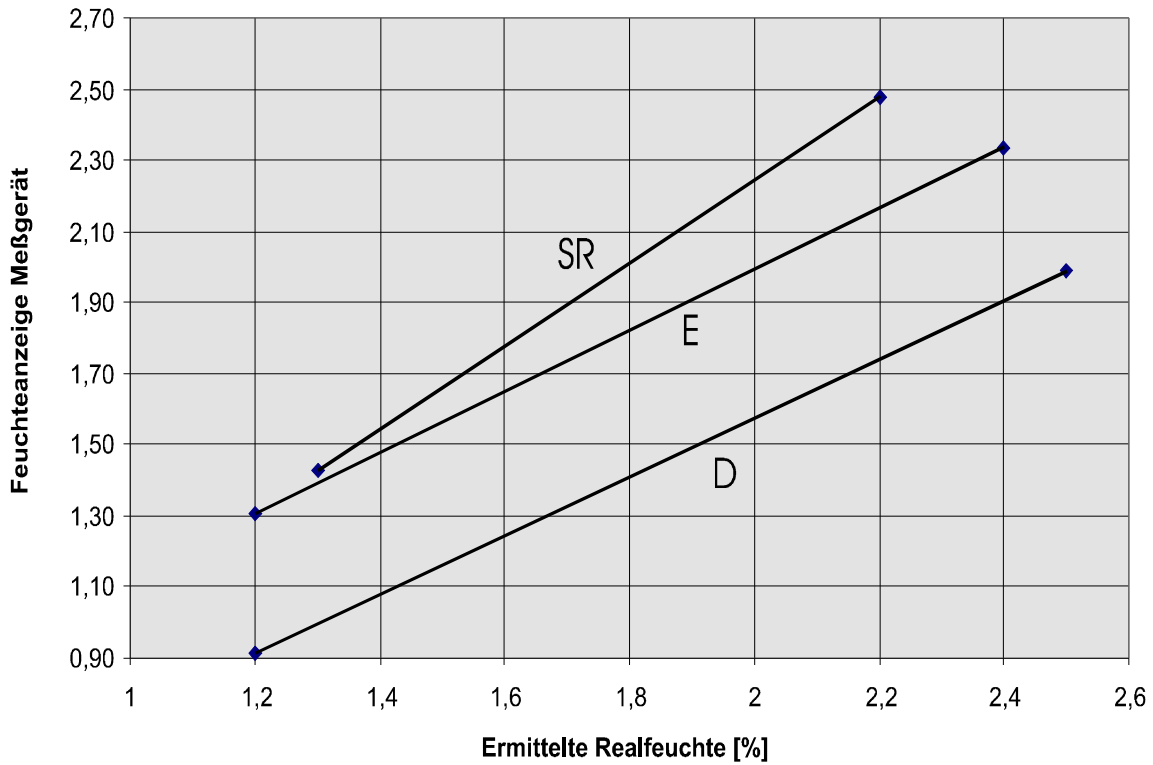


Abb. 123 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Fa. SMG, unverdichtet, rechnerische Korrektur anhand der Schüttdichte

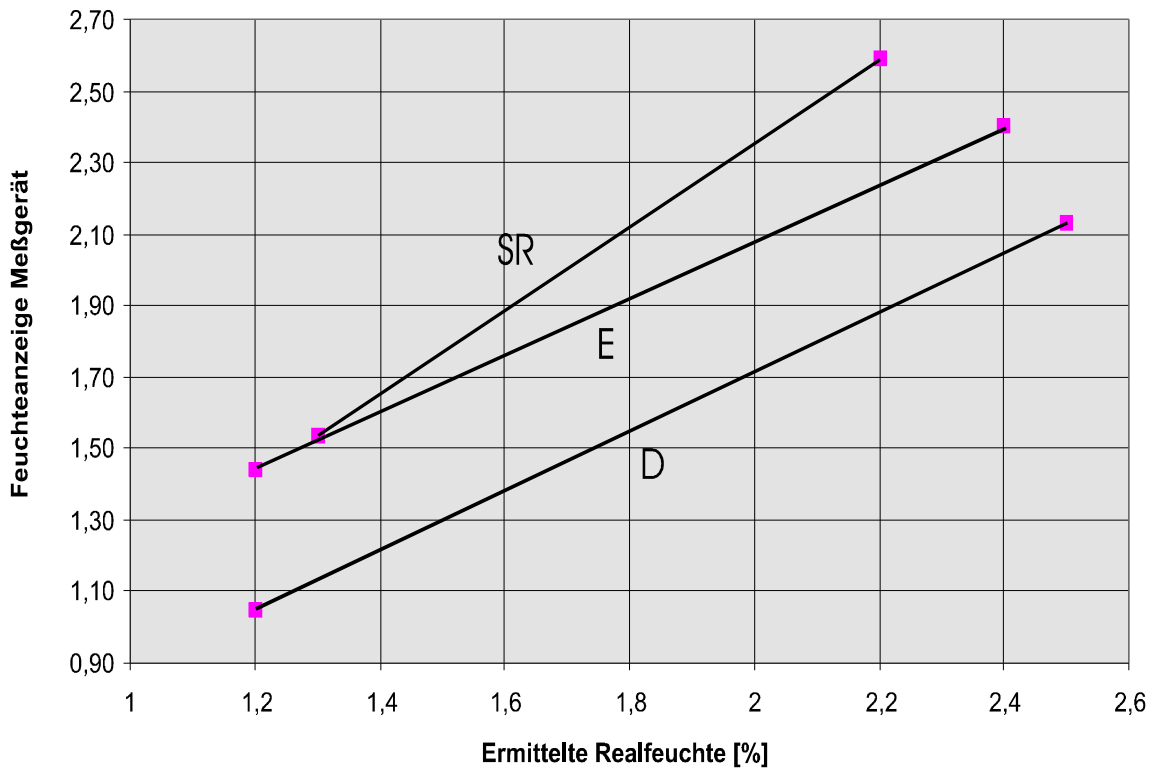


Abb. 124 : Vergleich der unterschiedlichen Bentonitsorten Fa. SMG, verdichtet um 10%, rechnerische Korrektur anhand der Schüttdichte

Anlage 3 : Vergleich des Verdichtbarkeitsmessgerätes mit Laborprüfgeräten

Vers Nr.	Bent. Art	Bent. Menge %	Wasser Menge %	Vers Datum	Verd. gem. %	Scherf. gem N/cm <sup>2</sup>	Dichte gem. g/cm <sup>3</sup>	Nach Vorverd. g/cm <sup>3</sup>	Verd. GF %	Scherf. GF N/cm <sup>2</sup>	Dichte GF g/cm <sup>3</sup>
16	D	1	1	12.5.	36,30	0,32	0,93	1,39	38,33	0,10	0,91
17	D	1	2	12.5.	39,17	0,30	0,86	1,28	42,67	0,12	0,85
18	D	1	3	12.5.	42,02	0,29	0,89	1,21	44,00	0,15	0,82
1	D	2	1	5.5.	39,08	0,41	0,90	1,90	40,33	0,38	0,87
2	D	2	2	5.5.	51,63	0,33	0,73	1,35	52,33	0,33	0,71
3	D	2	3	5.5.	52,00	0,34	0,72	1,25	52,33	0,28	0,71
19	D	3	1	12.5.	32,26	0,47	1,01	1,91	34,00	0,52	0,98
20	D	3	2	12.5.	54,78	0,33	0,68	1,31	54,00	0,47	0,67
21	D	3	3	12.5.	56,68	0,29	0,66	1,20	57,00	0,47	0,65
10	Q	1	1	11.5.	36,21	0,31	0,95	1,25	38,00	0,15	0,89
11	Q	1	2	11.5.	39,52	0,28	0,90	1,15	44,00	0,10	0,82
12	Q	1	3	11.5.	43,03	0,29	0,85	1,06	44,67	0,12	0,81
7	Q	2	1	11.5.	38,53	0,44	0,91	1,72	40,67	0,35	0,87
8	Q	2	2	11.5.	49,20	0,30	0,76	1,38	51,33	0,28	0,73
9	Q	2	3	11.5.	50,77	0,28	0,75	1,19	53,00	0,28	0,71
13	Q	3	1	11.5.	21,73	0,42	1,17	1,64	23,00	0,41	1,15
14	Q	3	2	11.5.	54,52	0,35	0,69	1,28	54,67	0,58	0,67
15	Q	3	3	11.5.	57,56	0,33	0,65	1,13	56,33	0,50	0,65
28	Q	6	1	18.5.	Mit dieser Rezeptur konnte kein auswertbarer Formstoff hergestellt werden						
29	Q	6	2	18.5.	46,86	0,35	0,80	2,56	50,33	2,12	0,74
30	Q	6	3	18.5.	64,96	0,24	0,54	1,74	64,33	1,38	0,54
22	SR	1	1	14.5.	36,25	0,32	0,94	1,41	39,00	0,13	0,89
23	SR	1	2	14.5.	38,87	0,28	0,90	1,31	42,67	0,10	0,84
24	SR	1	3	14.5.	38,65	0,30	0,90	1,27	43,33	0,12	0,84
4	SR	2	1	8.5.	43,61	0,45	0,84	1,74	44,33	0,43	0,82
5	SR	2	2	8.5.	50,58	0,30	0,75	1,37	51,33	0,30	0,73
6	SR	2	3	8.5.	51,40	0,30	0,74	1,23	51,33	0,32	0,73
25	SR	3	1	14.5.	36,51	0,56	0,94	2,25	39,33	0,58	0,89
26	SR	3	2	14.5.	55,25	0,27	0,68	1,30	56,00	0,52	0,65
27	SR	3	3	14.5.	56,89	0,23	0,66	1,19	57,33	0,38	0,64

Tab. 13 : Zusammenfassung der Ergebnisse der Prüfmischungen

Versuchsnummer	Bentonit-Art.	Bentonit-zugabemenge	Wasser-zugabemenge	Verdichtbarkeit automatisches. Prüfgerät (gem)	Verdichtbarkeit Laborprüfgerät (GF)	Abweichung absolut	Abweichung relativ
		%	%	%	%	%	% relativ
1	D	2	1	39,08	40,33	1,25	3,10
2	D	2	2	51,63	52,33	0,71	1,35
3	D	2	3	52,00	52,33	0,33	0,63
4	SR	2	1	43,61	44,33	0,72	1,63
5	SR	2	2	50,58	51,33	0,76	1,47
6	SR	2	3	51,40	51,33	0,07	0,13
7	Q	2	1	38,53	40,67	2,14	5,26
8	Q	2	2	49,20	51,33	2,13	4,15
9	Q	2	3	50,77	53,00	2,23	4,20
10	Q	1	1	36,21	38,00	1,79	4,71
11	Q	1	2	39,52	44,00	4,48	10,18
12	Q	1	3	43,03	44,67	1,63	3,65
13	Q	3	1	21,73	23,00	1,27	5,50
14	Q	3	2	54,52	54,67	0,15	0,27
15	Q	3	3	57,56	56,33	1,23	2,18
16	D	1	1	36,30	38,33	2,03	5,29
17	D	1	2	39,17	42,67	3,50	8,19
18	D	1	3	42,02	44,00	1,98	4,51
19	D	3	1	32,26	34,00	1,74	5,11
20	D	3	2	54,78	54,00	0,78	1,44
21	D	3	3	56,68	57,00	0,32	0,57
22	SR	1	1	36,25	39,00	2,75	7,05
23	SR	1	2	38,87	42,67	3,80	8,90
24	SR	1	3	38,65	43,33	4,69	10,81
25	SR	3	1	36,51	39,33	2,82	7,17
26	SR	3	2	55,25	56,00	0,75	1,34
27	SR	3	3	56,89	57,33	0,44	0,77
29	Q	6	2	46,86	50,33	3,47	6,90
30	Q	6	3	64,96	64,33	0,63	0,97
Mittelwert :						1,74	4,05
Maximum :						4,69	10,81

Tab. 14 : Gegenüberstellung der gemessenen Verdichtbarkeiten Laborprüfgerät und Betriebsmessgerät

Versuchsnummer	Bentonit-Art.	Bentonit-zugabemenge	Wasser-zugabemenge	Scherfestigkeit automatisches Prüfgerät (gem)	Scherfestigkeit Laborprüfgerät (GF)	Abweichung absolut	Abweichung relativ
		%	%	N/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>	% relativ
1	D	2	1	0,41	0,38	0,04	10,03
2	D	2	2	0,33	0,33	0,01	2,47
3	D	2	3	0,34	0,28	0,06	20,16
4	SR	2	1	0,45	0,43	0,02	4,88
5	SR	2	2	0,30	0,30	0,00	0,91
6	SR	2	3	0,30	0,32	0,02	6,42
7	Q	2	1	0,44	0,35	0,09	25,67
8	Q	2	2	0,30	0,28	0,02	5,62
9	Q	2	3	0,28	0,28	0,00	0,78
10	Q	1	1	0,31	0,15	0,16	109,52
11	Q	1	2	0,28	0,10	0,18	175,88
12	Q	1	3	0,29	0,12	0,17	146,23
13	Q	3	1	0,42	0,41	0,02	4,03
14	Q	3	2	0,35	0,58	0,23	40,15
15	Q	3	3	0,33	0,50	0,17	33,35
16	D	1	1	0,32	0,10	0,22	218,60
17	D	1	2	0,30	0,12	0,18	155,30
18	D	1	3	0,29	0,15	0,14	96,29
19	D	3	1	0,47	0,52	0,05	9,88
20	D	3	2	0,33	0,47	0,13	28,36
21	D	3	3	0,29	0,47	0,17	37,07
22	SR	1	1	0,32	0,13	0,19	141,42
23	SR	1	2	0,28	0,10	0,18	178,32
24	SR	1	3	0,30	0,12	0,19	158,65
25	SR	3	1	0,56	0,58	0,02	4,02
26	SR	3	2	0,27	0,52	0,24	46,95
27	SR	3	3	0,23	0,38	0,16	40,66
29	Q	6	2	0,35	2,12	1,77	83,44
30	Q	6	3	0,24	1,38	1,14	82,68
Mittelwert :						0,21	64,40
Maximum :						1,77	218,60

Tab. 15 : Gegenüberstellung der gemessenen Scherfestigkeiten Laborprüfgerät und Betriebsmessgerät

Versuchsnummer	Bentonit-Art.	Bentonitzugabemenge	Wassersugabemenge	Formstoffdichte automatisches Prüfgerät (gem.)	Formstoffdichte Laborprüfgerät (GF)	Abweichung absolut	Abweichung relativ
		%	%	N/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	% relativ
1	D	2	1	0,90	0,87	0,03	3,60
2	D	2	2	0,73	0,71	0,01	1,93
3	D	2	3	0,72	0,71	0,01	1,51
4	SR	2	1	0,84	0,82	0,02	2,45
5	SR	2	2	0,75	0,73	0,02	3,33
6	SR	2	3	0,74	0,73	0,01	0,80
7	Q	2	1	0,91	0,87	0,04	5,09
8	Q	2	2	0,76	0,73	0,04	5,03
9	Q	2	3	0,75	0,71	0,04	5,54
10	Q	1	1	0,95	0,89	0,06	6,97
11	Q	1	2	0,90	0,82	0,08	9,40
12	Q	1	3	0,85	0,81	0,04	5,26
13	Q	3	1	1,17	1,15	0,02	1,66
14	Q	3	2	0,69	0,67	0,01	1,92
15	Q	3	3	0,65	0,65	0,00	0,18
16	D	1	1	0,93	0,91	0,02	2,11
17	D	1	2	0,86	0,85	0,01	1,65
18	D	1	3	0,89	0,82	0,07	8,32
19	D	3	1	1,01	0,98	0,03	3,47
20	D	3	2	0,68	0,67	0,02	2,72
21	D	3	3	0,66	0,65	0,01	1,92
22	SR	1	1	0,94	0,89	0,05	5,33
23	SR	1	2	0,90	0,84	0,06	6,92
24	SR	1	3	0,90	0,84	0,06	7,43
25	SR	3	1	0,94	0,89	0,06	6,26
26	SR	3	2	0,68	0,65	0,03	3,92
27	SR	3	3	0,66	0,64	0,02	2,58
29	Q	6	2	0,80	0,74	0,06	8,73
30	Q	6	3	0,54	0,54	0,00	0,26
Mittelwert :						0,03	4,01
Maximum :						0,08	9,40

Tab. 16 : Gegenüberstellung der gemessenen Prüfkörperdichten Laborprüfgerät und neuentwickeltes Betriebsmessgerät

Versuchsnummer	Bentonit-Art.	Bentonitzugabemenge	Wassersugabemenge	Verdichtbarkeit automatisches Prüfgerät (gem.)	Formstoffdichte automatisches Prüfgerät (gem.)
		%	%	%	N/cm <sup>2</sup>
1	D	2	1	39,08	0,90
2	D	2	2	51,63	0,73
3	D	2	3	52,00	0,72
4	SR	2	1	43,61	0,84
5	SR	2	2	50,58	0,75
6	SR	2	3	51,40	0,74
7	Q	2	1	38,53	0,91
8	Q	2	2	49,20	0,76
9	Q	2	3	50,77	0,75
10	Q	1	1	36,21	0,95
11	Q	1	2	39,52	0,90
12	Q	1	3	43,03	0,85
13	Q	3	1	21,73	1,17
14	Q	3	2	54,52	0,69
15	Q	3	3	57,56	0,65
16	D	1	1	36,30	0,93
17	D	1	2	39,17	0,86
18	D	1	3	42,02	0,89
19	D	3	1	32,26	1,01
20	D	3	2	54,78	0,68
21	D	3	3	56,68	0,66
22	SR	1	1	36,25	0,94
23	SR	1	2	38,87	0,90
24	SR	1	3	38,65	0,90
25	SR	3	1	36,51	0,94
26	SR	3	2	55,25	0,68
27	SR	3	3	56,89	0,66
29	Q	6	2	46,86	0,80
30	Q	6	3	64,96	0,54

Tab. 17 : Gegenüberstellung der gemessenen Verdichtbarkeiten und Prüfkörperdichten, für das neuentwickelte Betriebsmessgerät

Versuchsnummer	Bentonit-Art.	Bentonit-zugabemenge	Wasser-zugabemenge	Verdichtbarkeit Laborprüfgerät (GF)	Formstoffdichte Laborprüfgerät (GF)
		%	%	%	g/cm <sup>3</sup>
1	D	2	1	40,33	0,87
2	D	2	2	52,33	0,71
3	D	2	3	52,33	0,71
4	SR	2	1	44,33	0,82
5	SR	2	2	51,33	0,73
6	SR	2	3	51,33	0,73
7	Q	2	1	40,67	0,87
8	Q	2	2	51,33	0,73
9	Q	2	3	53,00	0,71
10	Q	1	1	38,00	0,89
11	Q	1	2	44,00	0,82
12	Q	1	3	44,67	0,81
13	Q	3	1	23,00	1,15
14	Q	3	2	54,67	0,67
15	Q	3	3	56,33	0,65
16	D	1	1	38,33	0,91
17	D	1	2	42,67	0,85
18	D	1	3	44,00	0,82
19	D	3	1	34,00	0,98
20	D	3	2	54,00	0,67
21	D	3	3	57,00	0,65
22	SR	1	1	39,00	0,89
23	SR	1	2	42,67	0,84
24	SR	1	3	43,33	0,84
25	SR	3	1	39,33	0,89
26	SR	3	2	56,00	0,65
27	SR	3	3	57,33	0,64
29	Q	6	2	50,33	0,74
30	Q	6	3	64,33	0,54

Tab. 18 : Gegenüberstellung der gemessenen Verdichtbarkeiten und Prüfkörperdichten, für das Laborprüfgerät GF



Versuchsnummer	Bentonit-Art.	Bentonitzugabemenge	Wassersugabemenge	Verdichtbarkeit automatisches Prüfgerät, nach Vorverdichtung (gem)	Verdichtbarkeit Laborprüfgerät (GF)
		%	%	%	N/cm <sup>2</sup>
1	D	2	1	1,90	40,33
2	D	2	2	1,35	52,33
3	D	2	3	1,25	52,33
4	SR	2	1	1,74	44,33
5	SR	2	2	1,37	51,33
6	SR	2	3	1,23	51,33
7	Q	2	1	1,72	40,67
8	Q	2	2	1,38	51,33
9	Q	2	3	1,19	53,00
10	Q	1	1	1,25	38,00
11	Q	1	2	1,15	44,00
12	Q	1	3	1,06	44,67
13	Q	3	1	1,64	23,00
14	Q	3	2	1,28	54,67
15	Q	3	3	1,13	56,33
16	D	1	1	1,39	38,33
17	D	1	2	1,28	42,67
18	D	1	3	1,21	44,00
19	D	3	1	1,91	34,00
20	D	3	2	1,31	54,00
21	D	3	3	1,20	57,00
22	SR	1	1	1,41	39,00
23	SR	1	2	1,31	42,67
24	SR	1	3	1,27	43,33
25	SR	3	1	2,25	39,33
26	SR	3	2	1,30	56,00
27	SR	3	3	1,19	57,33
29	Q	6	2	2,56	50,33
30	Q	6	3	1,74	64,33

Tab. 19 : Gegenüberstellung der nach Anlegen eines Vordrucks von 1 Bar gemessenen Verdichtbarkeiten des Betriebsmessgerätes mit den Verdichtbarkeiten des Vergleichsmessgerätes GF

Anlage 4 : Versuche in der Fa. Georg Fischer, Mettmann

ZEIT	Sa	NS	Scherfestigk. N/cm2	Aussch.-druck bar	Temp. °C	Wasser zugabe %	Verd Formst. %	Verd. Altsand %	Altsand-Feuchte %	Wasserzugabe %	Prüfk.-masse g	Verd. 1 %	Verd. 2 %	Wasser gehalt %	Nass-zugf. N/cm2	Grün-druckf. N/cm2	C-Gehalt %	Gas-durchl. %	Schlüt.-gew. g	Bentonit zugabe %	GKB zugabe %
11:20:00	1	0	0,47	2,20	33,50	H2O Ist 0,58	Verd. FS 39,07	Verd. Alts. 25,06	2,96	H2O Soll 0,72	143,0	39,0	40,0	3,3	0,29	20,4	5,0	85,0	173,2	75/65	75/70
11:30:00	1	0	0,48	1,75	33,67	0,68	37,80	26,78	3,05	0,64	143,0	39,0	40,0	3,3	0,29	20,4	5,0	85,0	173,2	75/65	75/70
11:40:00	1	0	0,47	1,89	34,00	0,64	39,41	25,69	2,99	0,64	143,0	39,0	40,0	3,3	0,29	20,4	5,0	85,0	173,2	75/65	75/70
11:50:00	1	0	0,45	1,61	32,25	0,68	38,58	25,99	3,01	0,68	143,0	39,0	40,0	3,3	0,29	20,4	5,0	85,0	173,2	75/65	75/70
12:00:00	1	0	0,48	1,53	32,50	0,65	38,87	27,10	3,06	0,62	143,0	39,0	40,0	3,3	0,29	20,4	5,0	85,0	173,2	75/65	75/70
12:10:00	1	0	0,46	1,43	32,00	0,84	38,98	25,21	2,97	0,72	143,0	39,0	40,0	3,3	0,29	20,4	5,0	85,0	173,2	75/65	75/70
12:20:00	1	0	0,44	1,38	32,25	0,63	41,43	27,50	3,08	0,60	143,0	38,0	41,0	3,3	0,29	19,3	4,9	88,0	173,2	65,00	70,00
12:30:00	1	0	0,45	1,38	32,50	0,70	40,37	25,73	3,00	0,69	143,0	38,0	41,0	3,3	0,29	19,3	4,9	88,0	173,2	65,00	70,00
12:40:00	1	0	0,44	1,44	31,75	0,71	39,33	26,04	3,01	0,67	143,0	38,0	41,0	3,3	0,29	19,3	4,9	88,0	173,2	65,00	70,00
12:50:00	1	0	0,44	1,47	33,20	0,72	40,11	26,67	3,04	0,64	143,0	38,0	41,0	3,3	0,29	19,3	4,9	88,0	173,2	65,00	70,00
13:00:00	1	0	0,45	1,47	33,50	0,71	39,62	26,83	3,05	0,64	143,0	38,0	41,0	3,3	0,29	19,3	4,9	88,0	173,2	65,00	70,00
13:10:00	1	0	0,45	1,47	34,33	0,51	38,75	29,09	3,16	0,53	143,0	38,0	41,0	3,3	0,29	19,3	4,9	88,0	173,2	65,00	70,00
13:20:00	1	0	0,43	1,44	33,50	0,42	38,18	28,33	3,12	0,56	143,0	38,0	41,0	3,3	0,29	19,3	4,9	88,0	173,2	65,00	70,00
13:30:00	1	0	0,43	1,58	33,50	0,73	36,91	25,23	2,97	0,71	143,0	38,0	41,0	3,3	0,29	19,3	4,9	88,0	173,2	65,00	70,00
13:40:00	1	0	0,46	1,55	31,50	0,74	39,57	26,00	3,01	0,68	143,0	38,0	41,0	3,3	0,29	19,3	4,9	88,0	173,2	65,00	70,00
13:50:00	1	0	0,42	1,58	33,00	0,54	39,63	26,37	3,03	0,66	143,0	38,0	41,0	3,3	0,29	19,3	4,9	88,0	173,2	65,00	70,00
14:00:00	1	0	0,43	1,64	32,50	1,40	37,76	25,79	3,00	0,69	143,0	38,0	41,0	3,3	0,29	19,3	4,9	88,0	173,2	65,00	70,00
14:10:00	1	0	0,40	1,67	31,00	1,12	37,53	25,25	2,97	0,71	143,0	38,0	41,0	3,3	0,29	19,3	4,9	88,0	173,2	65,00	70,00
14:20:00	1	0	0,44	1,60	31,75	0,66	39,16	27,29	3,07	0,61	143,0	38,0	41,0	3,3	0,29	19,3	4,9	88,0	173,2	65,00	70,00
14:30:00	1	0	0,46	1,54	33,25	0,39	39,11	31,22	3,26	0,42	143,0	38,0	40,0	3,2	0,30	20,4	4,9	75,0	175,0	65/60	70,00
14:40:00	1	0	0,42	1,48	33,25	0,25	38,10	31,90	3,29	0,39	143,0	38,0	40,0	3,2	0,30	20,4	4,9	75,0	175,0	65/60	70,00
14:50:00	1	0	0,44	1,56	34,75	0,30	38,38	31,28	3,26	0,42	143,0	38,0	40,0	3,2	0,30	20,4	4,9	75,0	175,0	65/60	70,00
15:00:00	1	0	0,44	1,53	33,50	0,36	36,91	29,57	3,18	0,42	143,0	38,0	40,0	3,2	0,30	20,4	4,9	75,0	175,0	65/60	70,00
15:10:00	1	1	0,46	1,47	33,25	0,50	38,67	23,82	2,90	0,78	143,0	38,0	40,0	3,2	0,30	20,4	4,9	75,0	175,0	65/60	70,00
15:20:00	1	1	0,42	1,38	33,25	0,87	40,39	20,20	2,73	0,96	143,0	38,0	40,0	3,2	0,30	20,4	4,9	75,0	175,0	65/60	70,00
15:30:00	1	1	0,42	1,42	32,50	1,00	39,86	20,54	2,74	0,94	143,0	38,0	40,0	3,2	0,30	20,4	4,9	75,0	175,0	65/60	70,00
15:40:00	1	1	0,44	1,42	32,00	0,90	40,48	21,27	2,78	0,91	143,0	38,0	40,0	3,2	0,30	20,4	4,9	75,0	175,0	65/60	70,00

Sa	Sand im Mischer	143,00	Eründruckfestigkeit [N/cm2]	19,30
NS	Neusandzufluß	39/41	Kohlenstoffgehalt [%]	4,80
H2O Ist	Wasserzugabe der vorhandenen Steuerung	3,20	Gasdurchlässigkeit	85,00
Verd. FS	Verdichtbarkeit Formstoff (Fertigsand)	0,29	Schüttlichte [g/cm3]	0,89
Verd. Alts.	Verdichtbarkeit Altsand	8,20	Glühverl. Schl. [%]	2,70
H2O Soll	Ergebnis der Regelung anhand der Verdichtbarkeit	11,60	Inerter Anteil [%]	0,70
		6,10	Schamottierungsgrad [%]	
		3,40	Schwefelgehalt [%]	0,08

Tab. 20 : Datenaufschreibung Tag 7

ZEIT	Sa	NS	Scherfestigk. N/cm2	Aussch.-druck bar	Temp. °C	Wasserzugabe %	Verd. FS	Verd. %	Verd. Alts.	Altsand-Feuchte %	Wasserzugabe %	Prüfk.-masse g	Verd. 1 %	Verd. 2 %	Wasser-gehalt %	Nass-zugf. N/cm2	Grün-druckf. N/cm2	C-Gehalt %	Gas-durchl.	Schütt-gew. g	Bentonit-zugabe %	GKB zugabe %
11:00:00	1	0	0,60	1,72	25,00	H2O Ist 0,84	Verd. FS 40,69	32,01	Verd. Alts. 32,01	3,30	H2O Soll 0,39	144,0	37,0	40,0	3,1	0,30	21,2	4,6	90,0	180,4	60,00	85,00
11:10:00	1	0	0,56	1,72	26,25	0,68	39,43	27,26	27,26	3,07	0,62	144,0	37,0	40,0	3,1	0,30	21,2	4,6	90,0	180,4	60,00	85,00
11:20:00	1	0	0,48	1,77	26,00	0,73	40,27	24,76	24,76	2,95	0,74	144,0	37,0	40,0	3,1	0,30	21,2	4,6	90,0	180,4	60,00	85,00
11:30:00	1	1	0,47	1,73	25,50	0,84	40,52	24,24	24,24	2,92	0,76	144,0	37,0	40,0	3,1	0,30	21,2	4,6	90,0	180,4	60,00	85,00
11:40:00	1	1	0,45	1,61	25,75	0,90	38,97	21,82	21,82	2,81	0,88	144,0	37,0	40,0	3,1	0,30	21,2	4,6	90,0	180,4	60,00	85,00
11:50:00	1	1	0,45	1,61	25,80	1,26	40,28	22,29	22,29	2,83	0,86	144,0	37,0	40,0	3,1	0,30	21,2	4,6	90,0	180,4	60,00	85,00
12:00:00	1	1	0,45	1,48	26,25	1,42	39,70	21,91	21,91	2,81	0,87	144,0	37,0	40,0	3,1	0,30	21,2	4,6	90,0	180,4	60,00	85,00
12:10:00	1	1	0,44	1,48	26,50	1,20	38,69	22,48	22,48	2,84	0,85	144,0	37,0	40,0	3,1	0,30	21,2	4,6	90,0	180,4	60,00	85,00
12:20:00	1	1	0,45	1,47	26,80	1,12	39,85	22,55	22,55	2,84	0,84	144,0	37,0	40,0	3,1	0,30	21,2	4,6	90,0	180,4	60,00	85,00
12:30:00	1	1	0,43	1,44	27,75	1,42	39,67	22,54	22,54	2,84	0,84	144,0	37,0	40,0	3,1	0,28	21,2	4,5	86,0	180,4	60/65	90/95
12:40:00	1	1	0,45	1,47	26,50	1,16	40,07	22,69	22,69	2,85	0,84	144,0	37,0	40,0	3,1	0,28	21,2	4,5	86,0	180,4	60/65	90/95
12:50:00	1	1	0,44	1,43	26,60	1,42	40,24	22,71	22,71	2,85	0,84	144,0	37,0	40,0	3,1	0,28	21,2	4,5	86,0	180,4	60/65	90/95
13:00:00	1	1	0,43	1,43	26,75	1,20	39,94	21,97	21,97	2,81	0,87	144,0	37,0	40,0	3,1	0,28	21,2	4,5	86,0	180,4	60/65	90/95
13:10:00	1	1	0,44	1,49	26,75	1,14	39,95	22,23	22,23	2,83	0,86	144,0	37,0	40,0	3,1	0,28	21,2	4,5	86,0	180,4	60/65	90/95
13:20:00	1	1	0,44	1,48	26,40	1,33	40,51	22,19	22,19	2,82	0,86	144,0	37,0	40,0	3,1	0,28	21,2	4,5	86,0	180,4	60/65	90/95
13:30:00	1	1	0,43	1,59	26,50	1,20	39,25	22,65	22,65	2,85	0,84	144,0	37,0	40,0	3,1	0,28	21,2	4,5	86,0	180,4	60/65	90/95
13:40:00	1	1	0,45	1,62	27,00	1,10	39,47	22,68	22,68	2,85	0,84	144,0	37,0	40,0	3,1	0,28	21,2	4,5	86,0	180,4	60/65	90/95
13:50:00	1	1	0,45	1,48	27,00	1,26	40,29	22,63	22,63	2,85	0,84	144,0	37,0	40,0	3,1	0,28	21,2	4,5	86,0	180,4	60/65	90/95
14:00:00	1	1	0,47	1,57	26,60	1,13	40,13	24,26	24,26	2,92	0,76	144,0	37,0	40,0	3,1	0,28	21,2	4,5	86,0	180,4	60/65	90/95
14:10:00	1	1	0,45	1,55	25,75	1,26	40,12	25,20	25,20	2,97	0,72	144,0	37,0	40,0	3,1	0,28	21,2	4,5	86,0	180,4	60/65	90/95
14:20:00	1	1	0,43	1,57	26,00	1,16	41,47	24,65	24,65	2,94	0,74	144,0	37,0	40,0	3,1	0,28	21,2	4,5	86,0	180,4	60/65	90/95
14:30:00	1	1	0,43	1,64	26,00	1,08	39,38	22,29	22,29	2,83	0,86	144,0	37,0	40,0	3,1	0,28	21,2	4,5	86,0	180,4	60/65	90/95
14:40:00	1	0	0,46	1,50	26,50	1,16	39,09	21,57	21,57	2,79	0,89	144,0	37,0	40,0	3,1	0,28	21,2	4,5	86,0	180,4	60/65	90/95
14:50:00	1	1	0,46	1,60	25,50	1,15	38,51	22,46	22,46	2,84	0,85	144,0	37,0	40,0	3,1	0,28	21,2	4,5	86,0	180,4	60/65	90/95

Prüfkörpermasse [g]	143,00	Gründruckfestigkeit [N/cm2]	20,40
Verdichtbarkeit [%]	39/41	Kohlenstoffgehalt [%]	4,80
Wassergehalt [%]	3,30	Gasdurchlässigkeit	87,00
Natzzugfestigkeit [N/cm2]	0,29	Schüttdichte [g/cm3]	0,89
Binef. Bentonit [%]	9,30	Glühvert. Schl. [%]	2,40
Schlämstoff [%]	12,20	Inerter Anteil [%]	0,50
Glühvert. ges. [%]	5,80	Schamottierungsgrad [%]	8,70
Glühvert. Sand [%]	3,40	Schwefelgehalt [%]	0,09

Sa Sand im Mischer  
NS Neusandzulauf  
H2O ist Wasserzugabe der vorhandenen Steuerung  
Verd. FS Verdichtbarkeit Formstoff (Fertigsand)  
Verd. Alts. Verdichtbarkeit Altsand  
H2O Soll Ergebnis der Regelung anhand der Verdichtbarkeit

Tab. 21 : Datenaufschreibung Tag 8

ZEIT	Sa	NS	Scherfestigk. N/cm2	Aussch.-druck bar	Temp. °C	Wasserzugabe %	Wasserzugabe H2O Ist	Verd. %	Verd. FS	Verd. %	Verd. Alts.	Altsand-Feuchte %	Wasserzugabe %	H2O Soll	Prüfk.-masse g	Verd. 1 %	Verd. 2 %	Wasser-gehalt %	Nass-zugf. N/cm2	Grün-druckf. N/cm2	C-Gehalt %	Gas-durchl. %	Schütt-gew. g	Bentonit-zugabe %	GKB zugabe %
9:10:00	1	0	0,47	2,47	30,67	1,00	H2O Ist	38,65	Verd. FS	%	Verd. Alts.	2,93	0,75		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
9:20:00	1	1	0,50	1,79	29,50	0,94		38,99			24,02	2,91	0,77		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
9:30:00	1	1	0,52	1,69	30,25	0,84		39,79			25,87	3,00	0,68		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
9:40:00	1	1	0,51	1,63	31,00	0,77		40,44			28,48	3,13	0,56		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
9:50:00	1	1	0,52	1,72	32,25	0,70		38,84			32,35	3,32	0,37		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
10:00:00	1	1	0,53	1,51	31,75	1,67		38,05			30,71	3,24	0,45		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
10:10:00	1	1	0,52	1,45	30,50			37,70			29,11	3,16	0,53		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
10:20:00	1	1	0,50	1,28				37,70			32,40	3,32	0,37		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
11:20:00	1	1	0,51	2,50	30,00			36,96			28,28	3,12	0,57		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
11:30:00	1	1	0,48	2,15	29,75	0,76		38,17			28,39	3,12	0,56		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
11:40:00	1	0	0,49	1,66	26,50	1,26		37,13			21,62	2,80	0,89		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
11:50:00	1	1	0,47	1,67	28,50	1,26		38,42			24,95	2,96	0,73		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
12:00:00	1	1	0,50	1,61	29,00	0,71		41,12			26,44	3,03	0,66		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
12:10:00	1	1	0,49	1,63	28,50	3,77		41,50			26,08	3,01	0,67		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
12:30:00	1	1	0,50	1,68	27,75	1,26		39,13			25,88	3,00	0,68		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
12:40:00	1	1	0,48	1,65	29,00	0,99		38,00			22,63	2,85	0,84		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
12:50:00	1	1	0,51	1,63	28,50	1,07		37,85			24,23	2,92	0,76		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
13:00:00	1	1	0,49	1,58	28,50	3,77		35,43			22,58	2,84	0,84		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
13:10:00	1	1	0,49	1,49	27,00	1,16		37,99			19,42	2,69	0,99		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
13:20:00	1	1	0,50	1,57	28,00	1,07		35,60			26,16	3,02	0,67		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
13:30:00	1	1	0,49	1,57	27,75	0,98		38,70			24,51	2,94	0,75		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
13:40:00	1	1	0,46	1,62	30,00	0,84		38,82			25,38	2,98	0,71		143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
13:50:00	1	1	0,46	1,63	31,25	1,09		37,89			21,40	2,79	0,90		143,0	38,0	39,0	3,20	0,29	20,40	4,70	85,00	176,00	65/60	70,00
14:00:00	1	1	0,48	1,67	30,25	1,20		36,87			21,06	2,77	0,92		143,0	38,0	39,0	3,20	0,29	20,40	4,70	85,00	176,00	65/60	70,00
14:10:00	1	1	0,49	1,57	29,50	1,08		34,56			19,85	2,71	0,97		143,0	38,0	39,0	3,20	0,29	20,40	4,70	85,00	176,00	65/60	70,00

Prüfkörpermasse [g]	143,00	Gründruckfestigkeit [N/cm2]	19,50
Verdichtbarkeit [%]	37/40	Kohlenstoffgehalt [%]	4,80
Wassergehalt [%]	3,20	Gasdurchlässigkeit	85,00
Nasszugfestigkeit [N/cm2]	0,29	Schüttdichte [g/cm3]	0,89
Bindef. Bentonit [%]	8,40	Glühverl. Schl. [%]	2,60
Schlammstoff [%]	11,50	Inerter Anteil [%]	0,50
Glühverl. ges. [%]	5,90	Schamottierungsgrad [%]	
Glühverl. Sand [%]	3,30	Schwefelgehalt [%]	0,09

Sa Sand im Mischer  
NS Neusandzulauf  
H2O ist Wasserzugabe der vorhandenen Steuerung  
Verd. FS Verdichtbarkeit Formstoff (Fertigsand)  
Verd. Alts. Verdichtbarkeit Altsand  
H2O Soll Ergebnis der Regelung anhand der Verdichtbarkeit

Tab. 22 : Datenaufschreibung Tag 9

ZEIT	Sa	NS	Scherfestigk. N/cm <sup>2</sup>	Aussch.-druck bar	Temp. °C	Wasserzugabe %	Verd. %	Verd. Alts. %	Altsand-Feuchte %	Wasserzugabe %	Prüfk.-masse g	Verd. 1 %	Verd. 2 %	Wasser-gehalt %	Nass-zugf. N/cm <sup>2</sup>	Grün-druckf. N/cm <sup>2</sup>	C-Gehalt %	Gas-durchl.	Schütt-gew. g	Bentonit zugabe %	GKB zugabe %
9:10:00	1	0	0,47	2,47	30,67	H2O Ist 1,00	Verd. FS 38,65	Verd. Alts. 24,45	2,93	H2O Soll 0,75	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
9:20:00	1	1	0,50	1,79	29,50	0,94	38,99	24,02	2,91	0,77	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
9:30:00	1	1	0,52	1,69	30,25	0,84	39,79	25,87	3,00	0,68	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
9:40:00	1	1	0,51	1,63	31,00	0,77	40,44	28,48	3,13	0,56	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
9:50:00	1	1	0,52	1,72	32,25	0,70	38,84	32,35	3,32	0,37	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
10:00:00	1	1	0,53	1,51	31,75	1,67	38,05	30,71	3,24	0,45	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
10:10:00	1	1	0,52	1,45	30,50	1,67	37,70	29,11	3,16	0,53	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
10:20:00	1	1	0,50	1,28			37,70	32,40	3,32	0,37	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
11:20:00	1	1	0,51	2,50	30,00		36,96	28,28	3,12	0,57	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
11:30:00	1	1	0,48	2,15	29,75	0,76	38,17	28,39	3,12	0,56	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
11:40:00	1	0	0,49	1,66	26,50	1,26	37,13	21,62	2,80	0,89	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
11:50:00	1	1	0,47	1,67	28,50	1,26	38,42	24,95	2,96	0,73	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
12:00:00	1	1	0,50	1,61	29,00	0,71	41,12	26,44	3,03	0,66	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
12:10:00	1	1	0,49	1,63	28,50	3,77	41,50	26,08	3,01	0,67	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
12:30:00	1	1	0,50	1,68	27,75	1,26	39,13	25,88	3,00	0,68	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
12:40:00	1	1	0,48	1,65	29,00	0,99	38,00	22,63	2,85	0,84	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
12:50:00	1	1	0,51	1,63	28,50	1,07	37,85	24,23	2,92	0,76	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
13:00:00	1	1	0,49	1,58	28,50	3,77	35,43	22,58	2,84	0,84	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
13:10:00	1	1	0,49	1,49	27,00	1,16	37,99	19,42	2,69	0,99	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
13:20:00	1	1	0,50	1,57	28,00	1,07	35,60	26,16	3,02	0,67	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
13:30:00	1	1	0,49	1,57	27,75	0,98	38,70	24,51	2,94	0,75	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
13:40:00	1	1	0,46	1,62	30,00	0,84	38,82	25,38	2,98	0,71	143,0	38,0	39,0	3,2	0,29	20,4	4,7	85,0	176,0	65/60	70,00
13:50:00	1	1	0,46	1,63	31,25	1,09	37,89	21,40	2,79	0,90	143,0	38,0	39,0	3,20	0,29	20,40	4,70	85,00	176,00	65/60	70,00
14:00:00	1	1	0,48	1,67	30,25	1,20	36,87	21,06	2,77	0,92	143,00	38,00	39,00	3,20	0,29	20,40	4,70	85,00	176,00	65/60	70,00
14:10:00	1	1	0,49	1,57	29,50	1,08	34,56	19,85	2,71	0,97	143,00	38,00	39,00	3,20	0,29	20,40	4,70	85,00	176,00	65/60	70,00

Sa	Prüfkörpermasse [g]	143,00	Gründruckfestigkeit [N/cm <sup>2</sup> ]	19,50
NS	Verdichtbarkeit [%]	37/40	Kohlenstoffgehalt [%]	4,80
H2O Ist	Wassergehalt [%]	3,20	Gasdurchlässigkeit	85,00
Verd. FS	Nasszugfestigkeit [N/cm <sup>2</sup> ]	0,29	Schüttdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	0,89
Verd. Alts.	Bindef. Bentonit [%]	8,40	Glühverf. Schl. [%]	2,60
H2O Soll	Schlammstoff [%]	11,50	Inerter Anteil [%]	0,50
	Glühverf. ges. [%]	5,90	Schamottierungsgrad [%]	
	Ergebnis der Regelung anhand der Verdichtbarkeit	3,30	Schwefelgehalt [%]	0,09

Tab. 23 : Datenaufschreibung Tag 10