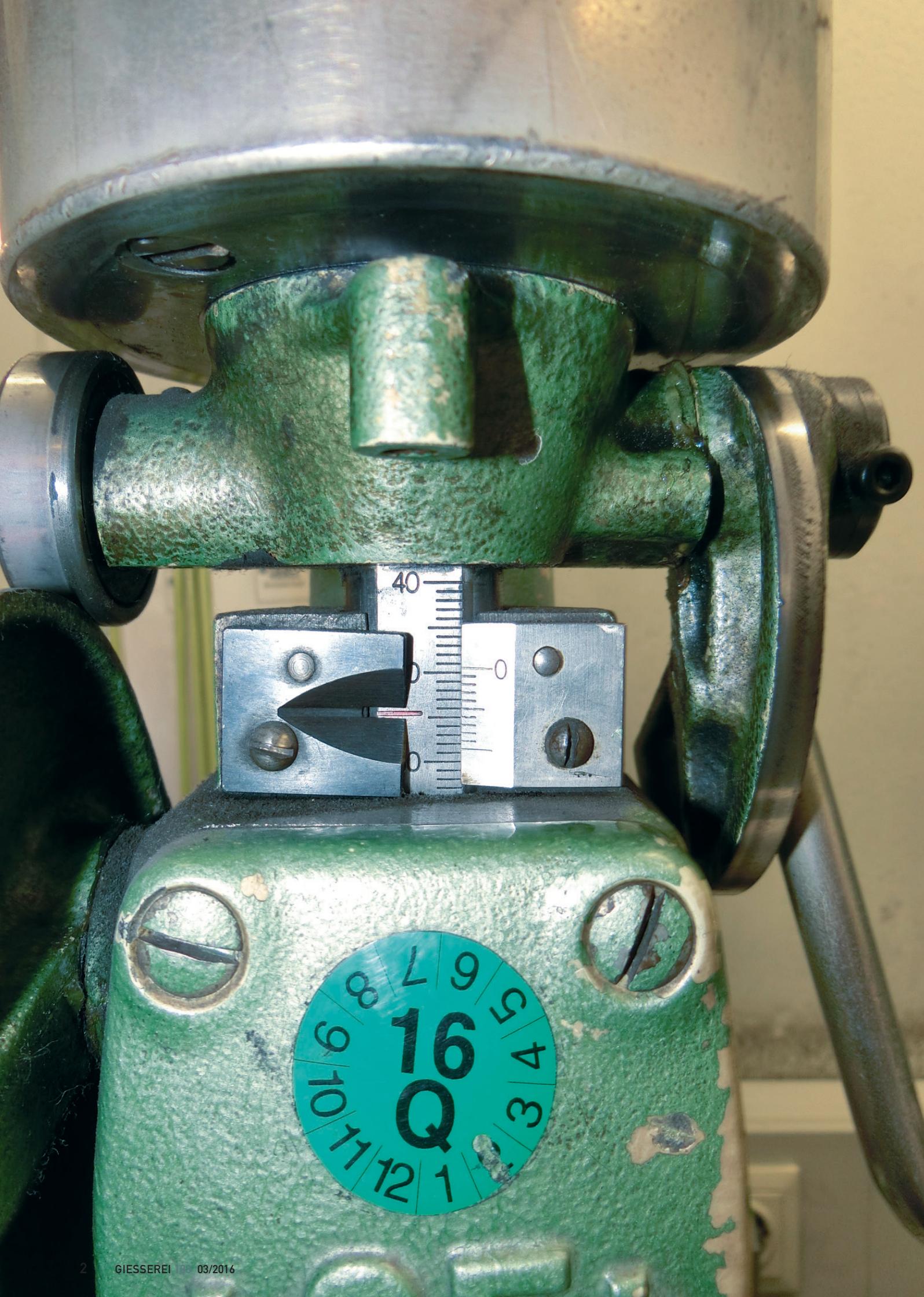


Die Fähigkeitsgrenzen üblicher Sandlabormessgeräte aus der Sicht eines Six Sigma-geprägten Qualitätsmanagements

VON WOLFGANG ERNST, BRAUNSCHWEIG



40

0

0

0

8 9 5 4 3 1 12 11 10 9 16 Q 7 6

Die Fähigkeitsgrenzen üblicher Sandlabormessgeräte aus der Sicht eines Six Sigma-geprägten Qualitätsmanagements

VON WOLFGANG ERNST, BRAUNSCHWEIG

Bei jedem Audit geraten viele Verantwortliche für die Sandaufbereitung in Bedrängnis, weil ihre aufgezeichneten Messwerte nicht den Vorgaben für die Produktionsfähigkeit standhalten – und jedes Mal entsteht Erklärungsnotstand. In diesem Beitrag wird anhand zweier vom IfG Institut für Gießereitechnik gGmbH, Düsseldorf, organisierter Ringversuche aus den Jahren 1986 und 2010 aufgezeigt, warum aktuell die Einhaltung dieser Vorgaben nur schwer möglich ist. Angesichts dieser besteht akuter Handlungsbedarf, eine fähige Messtechnik zu entwickeln.

Die Genauigkeit der Gussteilproduktion hängt von der Präzision der Messmittel ab. Wie gut sind wir?

Für das Nassgießverfahren ist ein bedenklicher Innovationsstillstand auf vielen Ebenen der Sandbehandlung eingetreten. Hochwertige Gussteile mit anspruchsvollen Maßtoleranzen werden nicht mehr mit diesem Verfahren produziert. Im Automotivebereich werden Motoren im Kernpaketverfahren hergestellt. Dabei geht es um eine markante Gewichtsminderung mit dem Ziel der Verminderung des CO₂-Ausstoßes, was sich nur mit einem dünnwandigen Guss erreichen lässt. Innerhalb weniger Jahre wurden das Gewicht von Gussteilen um ein Viertel verkleinert und die Wanddicken von 5 auf 3 mm reduziert. Die Maßtoleranzen wurden von ±1 mm auf ±0,5 mm verringert, angestrebt werden 0,3 mm.

Das Nassgießverfahren spielt dabei nur noch eine untergeordnete Rolle, die Kernpakete werden von bentonitgebundenem Formstoff getragen. Mit der Schmelze kommt dieser nicht mehr in Berührung. Prinzipiell wäre das Nassgießverfahren hier ebenfalls anwendbar, aber seine überraschenden „Ausreißer“ machen ihn unkalkulierbar.

Der im Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (BDG), Düsseldorf, organisierte Arbeitskreis „Bentonitgebundene Formstoffe“ hat vor einigen Jahren eine Diskussion mit dem programmatischen Titel „Nassguss 2020“ begonnen, um bewusst den Verbesserungsbedarf an den kritischen Stellen im Sandkreislauf aufzuzeigen. Einer der fünf wesentlichsten Punk-

te betraf die Messtechnik, speziell ihre Genauigkeit und den Bedarf der Erfassung weiterer noch nicht gemessener Größen (Fließfähigkeit und Zustand nach dem Abformen).

Forciert durch die Vorgaben der ISO 9001 sowie durch die generell gewachsenen Qualitätsansprüche in der Automobilindustrie, wurden bereits vor dem Jahrtausendwechsel sehr umfangreiche Methoden zur „Fähigkeitsbestimmung“ entwickelt. Prozess-, Maschinen- und Messmittelfähigkeit sind die Schlagworte, hinter denen sich weitgehende Bestimmungsansätze aufbauen.

Wie genau ist unsere Messtechnik?

Wachsen die Genauigkeitsansprüche durch Angabe immer kleinerer Toleranzen um den Sollwert, so muss auch die Messtechnik mithalten, um den Nachweis dazu erbringen können. Sie muss in der Lage sein, diese verkleinerten Grenzen reproduzierbar darstellen zu können. Dabei darf es keine Rolle spielen, mit welchem Gerät von welcher Person und an welchem Ort eine Sandprobe untersucht wird. Zwei Ringversuche, die vom IfG 1986 und 2010 organisiert wurden, können Aufschluss über die Qualität der eingesetzten Prüfmittel geben. Die Ergebnisse sind auszugsweise in den **Tabellen 1 bis 3** dokumentiert.

Der erste Einstieg für eine übliche Auswertung derartiger Datenmengen ist die Bestimmung des Mittelwertes (MW) und der Standardabweichung (Stabw). Damit verknüpft ist die Angabe der Spannweite, gebildet aus dem kleinsten und größten Messwert. Diese Werte geben eine erste Orientierung, sie erlauben jedoch noch nicht die Antwort auf die immer wieder gestellte Frage „War ich heute gut?“

Eine etwas in den Hintergrund geratene Bewertung erlaubt der relative Variationskoeffizient V:

$$V = \frac{s_g \cdot 100 \%}{\bar{X}_g} \quad (1)$$

s_g Standardabweichung
 \bar{X}_g Mittelwert

Tabelle 1: Ergebnisse 1. Ringversuch, organisiert 1986 vom IfG unter Beteiligung von 26 Firmen und Instituten.

	MW	Stabw	Rel. Varianz-koeffizient	max	min	Range	Toleranz	Messmittelfähigkeit c_g	Maschinenfähigkeit c_m
Wassergehalt in %	3,58	0,13	3,6	3,8	3,25	0,55	0,2	0,08	0,38
Verdichtbarkeit in %	29,7	2	6,7	34,2	25,7	8,5	4	0,10	0,50
Gasdurchlässigkeit	107,5	10,6	9,9	133	94	39			
Gründruckfestigkeit in N/cm ²	21,7	1,4	6,5	24,9	18,9	6			
Nasszugfestigkeit in N/cm ²	0,214	0,026	12,1	0,26	0,165	0,095			
Prüfkörpermasse in g	144,6	1,2	0,8	147	142	5			

Tabelle 2: Ergebnisse 1. Ringversuch, organisiert 1986 (gleiche Prüfer und gleiches Gerät wie bei Tabelle 1).

	MW	Stabw	Rel. Varianz-koeffizient	max	min	Range	Toleranz	Messmittelfähigkeit c_g	Maschinenfähigkeit c_m
Mittlere Korngröße in mm	0,244	0,005	2,0	0,25	0,24	0,01			
Wassergehalt in %	3,52	0,11	3,1	3,7	3,3	0,4	0,2	0,09	0,45
Verdichtbarkeit in %	37,7	1,26	3,3	40	33	7	4	0,16	0,79
Bindetongehalt in %	6,73	0,11	1,6	6,9	6,4	0,5			
Schlammstoffanteil in %	14,19	0,1	0,7	14,4	14	0,4			
Gesamtglühverlust	3,9	0,09	2,3	4,1	3,8	0,3			
Gasdurchlässigkeit	95,4	1,35	1,4	105	90	15			
Gründruckfestigkeit in N/cm ²	25,2	0,45	1,8	26,8	24,3	2,5			
Nasszugfestigkeit in N/cm ²	0,25	0,015	6,0	0,3	0,22	0,08			
Prüfkörpermasse in g	147,9	0,62	0,4	149	146	3			
Schüttdichte in g/cm ³	0,817	0,006	0,7	0,825	0,805	0,02			
Mittlere Korngröße in mm	0,244	0,005	2,0	0,25	0,24	0,01			

Tabelle 3: Ergebnisse 2. Ringversuch, organisiert 2010 vom IfG unter Beteiligung von 10 Firmen und Instituten.

	MW	Stabw	Rel. Varianz-koeffizient	max	min	Range	Toleranz	Messmittelfähigkeit c_g	Maschinenfähigkeit c_m
Wassergehalt in %	3,92	0,16	4,1	4,1	3,6	0,5	0,2	0,06	0,31
Verdichtbarkeit in %	27,2	1,52	5,6	30	25	5	4	0,13	0,66
Gasdurchlässigkeit	113	8,51	7,5	133	96	37			
Gründruckfestigkeit in N/cm ²	19,6	2,62	13,4	24,9	14,2	10,7			
Nasszugfestigkeit in N/cm ²	0,25	0,04	16,0	0,32	0,22	0,1			
Prüfkörpermasse in g	143	3,06	2,1	148	140	8			

Der Vergleich zweier unterschiedlicher Längen zeigt seine Aussagekraft. Verglichen wird eine Länge von 100 mm mit einer Standardabweichung von 1 mm mit der zehnfachen Länge von 1000 mm, wobei die gleiche Standardabweichung von 1 mm vorliegt. Der relative Variationskoeffizient ist im zweiten Fall deutlich kleiner; nämlich 0,1 % gegenüber 1 % im erstgenannten Fall. Man kann schon mit dieser Angabe erkennen, wie groß eine Streuung zum Mittelwert ist. Übliche Angaben für eine passable Streubreite bewegten sich in früheren Jahren bei 5 %. Im übertragenen Sinne: Die Beine in der Ofenröhre und der Kopf im Kühlschranks ergeben als mittlere Temperatur die Körpertemperatur, aber mit einer deutlichen Streubreite.

Exemplarisch wurden aus der Vielzahl üblicher Laborwerte zwei bedeutsame ausgewählt, die Formstofffeuchte (Wasser-

gehalt) und die Verdichtbarkeit. Bei dem Ringversuch von 1986 beteiligten sich 26 Firmen, die alle aus einer Formsandmischung eine definierte Probenmenge zur Auswertung erhielten (Tabelle 1). Für die Feuchtemessung ergab sich ein mittlerer Feuchtwert von 3,58 % mit einer Standardabweichung von 0,13 %. Das Streuungsmaß, gebildet aus der Differenz des größten Messwertes 3,8 % (max) und dem kleinsten 3,2 % (min) beträgt 0,6 %. Der relative Variationskoeffizient ergibt eine noch passable Größe von 3,6. In der heutigen Zeit ist diese Angabe unzureichend, da bei einer gängigen Toleranzangabe von $\pm 0,1$ % (was für die Toleranz im Beispiel $T = 0,2$ % bedeutet) die Toleranz deutlich überschritten wird. Natürlich könnte man noch einen weiteren Koeffizienten bilden, der das Verhältnis zwischen dem Range und dem Mittelwert aufzeigt, aber die Toleranz wird trotzdem nicht berücksichtigt.

Heutige Bestimmungsmethoden aus der statistischen Prozesskontrolle, wie sie für Six Sigma entwickelt wurden, benutzen Fähigkeitsindexe, wie die „Messmittelfähigkeit“ (c_g), die „Maschinenfähigkeit“ (c_m) oder die „Produktionsfähigkeit“ (c_p). Bei diesen Indexwerten spielt die Toleranz T eine bedeutsame Rolle und der Mittelwert ist nur noch mittelbar bei der Bestimmung der Standardabweichung enthalten.

Der Maschinenindex, der bei einer Geräteabnahme mit einigen wenigen Messergebnissen verwendet wird, soll für diese Betrachtung genutzt werden. Der typische komplementäre Wert des kritischen Maschinenfähigkeitsindex wird nicht betrachtet, da ein Referenzwert für diesen Ringversuch nicht vorliegt. Der in der Automobilindustrie verwendete Maschinenfähigkeitsindex definiert sich mit T als Toleranz und s_g als Standardabweichung 1:

$$c_m = \frac{T}{4 \cdot s_g} \quad (2)$$

Übertragen auf die Feuchtemesswerte beträgt $c_m = 0,38$.

Die gleiche Betrachtung soll nun auch für die Verdichtbarkeit vorgenommen werden. Im gleichen Ringversuch wurde ein kleiner Mittelwert von 29,9 % mit einer Standardabweichung von 2,0 % bestimmt. Der dazugehörige relative Variationskoeffizient von 6,7 % zeigt schon ein Überschreiten des üblichen Maßes von 5 %. Der Maschinenfähigkeitsindex beträgt $c_m = 0,50$.

Maschinenfähigkeitsindexe setzen bei 1,33 an. Angestrebt werden Werte ab 1,67 oder sogar 2,0. Davon sind die dargestellten Ergebnisse weit entfernt, was heute in einer anspruchsvollen Produktion erwartet wird.

Diese Betrachtung bezieht sich auf eine Dosiersteuerung, die Genauigkeit herstellen soll, wie der Mischer mit seinen Mess- und Dosiereinrichtungen, um eine gewünschte Feuchtigkeit und/oder Verdichtbarkeit mit ausreichender Gleichmäßigkeit und geringer Abweichung vom Sollwert zu erreichen. Die Fähigkeit der Messgeräte ist damit noch nicht beschrieben. Die Vorgaben dazu sind logischerweise schärfer; die Messmittelfähigkeitsindexe sind um ein Fünffaches höher.

Als elementare Voraussetzung für die Messmittelfähigkeitsuntersuchung wird zusätzlich die Auflösung für die Messwerte definiert. Es geht um die Teilschritte einer Anzeige, wie z. B. bei einer Waage, die pro Teilschritt 1 kg aufweist. Verständlicherweise ist eine derartige Waage z. B. für die Verwiegung im 100-g-Bereich nicht geeignet.

Als geeignet hat sich der Kennwert von 5 % der Merkmalstoleranz herausgestellt, wobei dieser häufig gebrauchte Begriff „Merkmal“ auch als Messwert zu verstehen ist. Bei einer Tole-

Tabelle 4: Mindesttoleranzen für Messmittelfähigkeitsindexe in den Größen: 0,33; 0,67; 1; 1,3; 1,67; 2,0 bei vorgegebener Standardabweichung der Verdichtbarkeit (Vd) und Feuchte.

$S_g = 2\% \text{ Verdichtbarkeit}$	$S_g = 0,15\% \text{ Feuchte}$
$T = 2 \cdot 20 \cdot 1/3 = 40/3\% = 13,3\% \text{ Vd}$	$T = 0,15 \cdot 20 \cdot 1/3 = 3/3\% = 1,0\% \text{ Vd}$
$T = 2 \cdot 20 \cdot 2/3 = 80/3\% = 26,6\% \text{ Vd}$	$T = 0,15 \cdot 20 \cdot 2/3 = 6/3\% = 2,0\% \text{ Vd}$
$T = 2 \cdot 20 \cdot 1 = 40,0\% \text{ Vd}$	$T = 0,15 \cdot 20 \cdot 1 = 3,0\% \text{ Vd}$
$T = 2 \cdot 20 \cdot 4/3 = 160/3\% = 53,2\% \text{ Vd}$	$T = 0,15 \cdot 20 \cdot 4/3 = 12/3\% = 4,0\% \text{ Vd}$
$T = 2 \cdot 20 \cdot 5/3 = 200/3\% = 66,5\% \text{ Vd}$	$T = 0,15 \cdot 20 \cdot 5/3 = 15/3\% = 5,0\% \text{ Vd}$
$T = 2 \cdot 20 \cdot 2 = 80,0\% \text{ Vd}$	$T = 0,15 \cdot 20 \cdot 2 = 6,0\% \text{ Vd}$

Tabelle 5: Mindesttoleranzen für Maschinenfähigkeitsindexe in den Größen: 0,33; 0,67; 1; 1,3; 1,67; 2,0 bei vorgegebener Standardabweichung der Verdichtbarkeit und Feuchte.

$S_g = 2\% \text{ Verdichtbarkeit}$	$S_g = 0,15\% \text{ Feuchte}$
$T = 2 \cdot 4 \cdot 1/3 = 8/3\% = 2,7\% \text{ Vd}$	$T = 0,15 \cdot 4 \cdot 1/3 = 0,6/3\% = 0,2\% \text{ Feuchte}$
$T = 2 \cdot 4 \cdot 2/3 = 16/3\% = 5,3\% \text{ Vd}$	$T = 0,15 \cdot 4 \cdot 2/3 = 1,2/3\% = 0,4\% \text{ Feuchte}$
$T = 2 \cdot 4 \cdot 1 = 8,0\% \text{ Vd}$	$T = 0,15 \cdot 4 \cdot 1 = 0,6\% \text{ Feuchte}$
$T = 2 \cdot 4 \cdot 4/3 = 32/3\% = 10,7\% \text{ Vd}$	$T = 0,15 \cdot 4 \cdot 4/3 = 2,4/3\% = 0,8\% \text{ Feuchte}$
$T = 2 \cdot 4 \cdot 5/3 = 40/3\% = 13,3\% \text{ Vd}$	$T = 0,15 \cdot 4 \cdot 5/3 = 3,0/3\% = 1,0\% \text{ Feuchte}$
$T = 2 \cdot 4 \cdot 2 = 16,0\% \text{ Vd}$	$T = 0,15 \cdot 4 \cdot 2 = 1,2\% \text{ Feuchte}$

Tabelle 6: Mindeststandardabweichungen für Messmittelfähigkeitsindexe in den Größen: 0,33; 0,67; 1; 1,3; 1,67; 2,0 bei vorgegebener Toleranz der Verdichtbarkeit und Feuchte.

Toleranz $T = 4\% \text{ Verdichtbarkeit}$	Toleranz $T = 0,2\% \text{ Feuchte}$
$S_g = 4/20 / (1/3) = 3/5 = 0,6\% \text{ Vd}$	$S_g = 0,2/20 / (1/3) = 3/100 = 0,03\% \text{ Feuchte}$
$S_g = 4/20 / (2/3) = 3/10 = 0,3\% \text{ Vd}$	$S_g = 0,2/20 / (2/3) = 3/50 = 0,015\% \text{ Feuchte}$
$S_g = 4/20 / 1 = 1/5 = 0,2\% \text{ Vd}$	$S_g = 0,2/20 / 1 = 1/100 = 0,01\% \text{ Feuchte}$
$S_g = 4/20 / (4/3) = 3/20 = 0,15\% \text{ Vd}$	$S_g = 0,2/20 / (4/3) = 3/400 = 0,0075\% \text{ Feuchte}$
$S_g = 4/20 / (5/3) = 3/25 = 0,12\% \text{ Vd}$	$S_g = 0,2/20 / (5/3) = 3/500 = 0,006\% \text{ Feuchte}$
$S_g = 4/20 / 2 = 1/10 = 0,1\% \text{ Vd}$	$S_g = 0,2/20 / 2 = 1/200 = 0,005\% \text{ Feuchte}$

Tabelle 7: Mindeststandardabweichungen für Messmittelfähigkeitsindexe in den Größen: 0,33; 0,67; 1; 1,3; 1,67; 2,0 bei vorgegebener Toleranz der Verdichtbarkeit und Feuchte.

Toleranz $T = 4\% \text{ Verdichtbarkeit}$	Toleranz $T = 0,2\% \text{ Feuchte}$
$S_g = 4/4 / (1/3) = 3 = 3,0\% \text{ Vd}$	$S_g = 0,2/4 / (1/3) = 3/20 = 0,15\% \text{ Feuchte}$
$S_g = 4/4 / (2/3) = 3/2 = 1,5\% \text{ Vd}$	$S_g = 0,2/4 / (2/3) = 3/40 = 0,075\% \text{ Feuchte}$
$S_g = 4/4 / 1 = 1 = 1,0\% \text{ Vd}$	$S_g = 0,2/4 / 1 = 1/20 = 0,05\% \text{ Feuchte}$
$S_g = 4/4 / (4/3) = 3/4 = 0,75\% \text{ Vd}$	$S_g = 0,2/4 / (4/3) = 3/80 = 0,0375\% \text{ Feuchte}$
$S_g = 4/4 / (5/3) = 3/5 = 0,60\% \text{ Vd}$	$S_g = 0,2/4 / (5/3) = 3/100 = 0,03\% \text{ Feuchte}$
$S_g = 4/4 / 2 = 1/2 = 0,5\% \text{ Vd}$	$S_g = 0,2/4 / 2 = 1/40 = 0,025\% \text{ Feuchte}$

ranz für die Verdichtbarkeit von 4 % muss die Anzeige mindestens eine Auflösung von 0,2 % aufweisen. Für die analoge Skalanzeige eines klassischen Gerätes für Rammstöße mit einer Anzeige in 1-mm-Schritten ist die Auflösung nicht ausreichend, da 1 mm einem Anzeigewert von 1 % Verdichtbarkeit entspricht. Damit ist ein Gerät mit dieser Auflösung nicht mehr geeignet. Erst durch den Einsatz eines Nonius, wie im Bild auf Seite 20 dargestellt, wird die Auflösung von 0,1 % erreicht. Diese Auflösung ist somit ausreichend.

Bei der Feuchtemessung werden im Labor weitestgehend thermisch-gravimetrisch arbeitende Geräte eingesetzt, die über

¹In der einschlägigen Literatur wird sehr häufig statt 1/4 der schärfere Wert 1/6 eingesetzt [4].



Bild 1: Maßverkörperung aus dem 16. Jahrhundert auf dem Braunschweiger Markt für die Länge einer Braunschweiger Elle.

eine Waage mit elektronischer Anzeige verfügen. Diese Waagen können $1/1000$ g Gewicht und somit $1/100$ % Feuchte anzeigen. Bei einer geforderten Feuchtetoleranz von $T = 0,2$ % ist minimal eine Feuchteanzeigenauflösung von $0,01$ % nötig, was bei den meisten heutigen Geräten möglich ist. Der Messmittelfähigkeitsindex definiert sich als

$$c_g = \frac{T}{20 \cdot s_g} \quad (3)$$

wobei T wieder die Toleranz und s_g die Standardabweichung der Messreihe ist. Unter Anwendung dieses Bestimmungsansatzes fallen die Ergebnisse dieses Kennwertes noch schlechter aus. Für die Feuchtemessung liegt er nur bei $0,08$ und für die Verdichtbarkeit bei $0,10^2$.

Annähernd 25 Jahre später wurde vom IfG ein 2. Ringversuch mit 10 Teilnehmern organisiert. Die Erwartung, bessere Werte in diesem Vergleich zu erhalten, war groß (Tabelle 3). Jedoch zeigte sich im identischen analytischen Statistikansatz, dass sich in den 24 Jahren nicht viel getan hat.

Für die Feuchtemessung ist die erreichte Standardabweichung $s_g = 0,16$ unmerklich höher, das Streumaß ist etwas kleiner, nämlich $R = 0,5$ % Feuchte. Der relative Variationskoeffizient hat bei einem Mittelwert von $3,52$ einen Wert von $4,1$ % und würde somit noch in einem passablen Bereich liegen. Aber die Streubreite mit $0,5$ % ist immer noch mehr als doppelt so groß wie die Toleranz, statt des fast dreifachen Wertes vor 24 Jahren. Auch ist sein Wert für die Messmittelfähigkeit $c_g = 0,06$ genauso niedrig.

Nicht sehr viel besser stellen sich die Werte für die Verdichtbarkeit dar. Zwar ist die Standardabweichung mit $s_g = 1,52$ % Verdichtbarkeit und dem daraus gebildeten relativen Varianzkoeffizienten von $5,6$ % erkennbar besser, aber bei der Betrachtung über den Kennwert der Messmittelfähigkeit werden die Unterschiede nur noch marginal, er beträgt für die Verdichtbarkeit auch nur $0,13$.

Die Streuungen einzelner Prüfer mit gleichem Gerät

Die bisherigen Auswertungen bezogen sich auf die Messung aller Prüfer mit ihren individuellen Geräten. Sie ließen aber keine Aussage darüber zu, ob sich der einzelne Prüfer mit seinen Wiederholungsmessungen im gleichen Maß der Streuung be-

wegt. Der Ringversuch von 1986 hat zusätzlich die Daten einzelner Prüfer aufgenommen und sie gesondert ausgewertet (Tabelle 2). Für die Feuchtemessung ist die erreichte Standardabweichung unmerklich kleiner $s_g = 0,11$, auch das Streumaß ist etwas kleiner, nämlich $R = 0,4$ % Feuchte. Der relative Variationskoeffizient hat bei einem Mittelwert von $3,52$ einen Wert von $3,1$ % und würde somit noch in einem passablen Bereich liegen. Die Streubreite mit $0,4$ % ist jedoch immer noch doppelt so groß wie die Toleranz, statt des mehr als vierfachen Wertes im Gesamtvergleich. Hingegen ist sein Wert für die Messmittelfähigkeit $c_g = 0,09$ genauso niedrig.

Nicht sehr viel besser stellen sich die Werte für die Verdichtbarkeit dar. Zwar ist die Standardabweichung mit $s_g = 1,26$ % Verdichtbarkeit und dem daraus gebildeten relativen Varianzkoeffizienten von $3,3$ % erkennbar besser, aber bei der Betrachtung des Kennwertes für die Messmittelfähigkeit werden die Unterschiede nur noch marginal, er beträgt für die Verdichtbarkeit auch nur $0,16$.

Kurzum, die aufgezeigten Schwankungen für den einzelnen Prüfer bewegen sich im gleichen Rahmen wie für die beiden Ringversuche. Die Streuungen lassen sich nicht über den Einsatz verschiedener Geräte in unterschiedlichen Laboratorien erklären.

Welche Toleranzen wären anzusetzen?

In der einschlägigen Literatur wird durchaus erkannt, dass sich die Relation zwischen Toleranz und Standardabweichung ungünstig darstellen kann. Es wird dann stets empfohlen, die Toleranzwerte anzupassen. Die Kennwerte sollen nicht verändert werden, weil die abdeckende Toleranz deutlich größer sein soll als die geforderte Streubreite aller Werte. Nur so können Lageverschiebungen durch Drift immer noch in der erlaubten Toleranzbreite abgefangen werden, ohne unzulässige Ausreißer aufzuweisen. Somit ist der Ansatz, von einer erreichbaren Standardabweichung auszugehen und von dort eine Toleranzgröße zu entwickeln.

In den **Tabellen 4** und **5** sind für 6 Qualitätskenngrößen die Toleranzen ermittelt worden. So erhält man durch erneute Umformung der Gleichungen für die Messmittelfähigkeit

$$T = s_g \cdot 20 \cdot c_g \quad (4)$$

und entsprechend für die Maschinenfähigkeit

²Korrektweise hätte für eine Auswertung des Ringversuches das sog. Verfahren 2 gewählt werden müssen, da hierbei besonderer Wert auf die Gesamtstreuung, Wiederholpräzision und Vergleichspräzision gelegt wird [3]. Zur Vereinfachung wurde das Verfahren 1 gewählt.

$$T = s_g \cdot 4 \cdot c_m \quad (5)$$

Sehr schnell ist zu erkennen: Wer sich mathematisch formal an die Indexgrößen unter Berücksichtigung üblicher Standardabweichungen halten will, muss unsinnig große Toleranzen ansetzen. Der Maschinenfähigkeitsindex von 1,67 würde die Toleranz für die Verdichtbarkeit auf 13,3 % und für die Feuchte auf 1,0 % vergrößern. Das bedarf keiner weiteren Debatten – so großzügig dürfen die Toleranzen für den Formsand nicht ausfallen.

Welche Standardabweichungen müssten minimal eingehalten werden?

Ausgangspunkt sind erneut die beiden Bestimmungsgleichungen für die Messmittelfähigkeit und für die Maschinenfähigkeit, die sich einfach umformen lassen. So erhält man für die Messmittelfähigkeit

$$s_g = \frac{T}{20 \cdot c_g} \quad (6)$$

und entsprechend für die Maschinenfähigkeit

$$s_g = \frac{T}{4 \cdot c_m} \quad (7)$$

Für 6 typische c_m -Werte wurden in den **Tabellen 6** und **7** die minimal erforderlichen Standardabweichungen für die beiden Qualitätskenngrößen Messmittelfähigkeit sowie Maschinenfähigkeit bestimmt. Mit einem Maschinenfähigkeitsindex von $c_m = 1,67$ und einer Verdichtbarkeitstoleranz von $T = 4 \%$ darf die Standardabweichung höchstens $s_g = 0,6 \%$ (!) betragen (Tabelle 7). Entsprechend ergibt sich bei einer Toleranz von $0,2 \%$ für die Feuchte eine minimale Standardabweichung von $0,03 \%$ (Tabelle 7). Die Messmittelfähigkeit bei $c_g = 1,33$ verlangt für die Verdichtbarkeit $0,15 \%$ und für die Feuchte $0,0075 \%$ (!) (Tabelle 6).

Zwischenbilanz – die Labormessgeräte erreichen nicht die aktuellen Größen für Fähigkeitskennwerte

1. Seit dem 1. Ringversuch hat es keine Verbesserung der Messgeräte gegeben; die Kennwerte liegen immer noch niedrig und sind weit davon entfernt, aktuelle Fähigkeitsansprüche zu erfüllen. Diese Streuungen zeigen sich sowohl in der Masse aller Werte als auch, wenn der einzelne Prüfer kleine Wiederholungsreihen vornimmt.

2. Für viele Messwertgrößen im Sandlabor gibt es keine Maßverkörperung, wie sie zum Beispiel in Braunschweig auf dem Markt für das Längenmaß einer Elle verwendet wird (**Bild 1**). Heute haben wir auf der ganzen Welt einheitliche Normalen, über die die Rückführbarkeit zu unseren Messgeräten hergestellt wird. Leider gibt es nur einige wenige dafür. Für die Feuchtemessung gibt es kein Urschwämmchen für $3,2 \%$ Feuchte, über das sich Feuchtemessgeräte kalibrieren ließen. Entsprechend lässt sich die Druckfestigkeit in letzter Konsequenz auch nicht vergleichend überprüfen, da die Probe zerstört wird.

Nun lässt sich berechtigt kritisch einwenden, dass die Messmittelfähigkeit nicht unbedingt mit irgendeinem Formstoff bestimmbar ist, da sich die Messungen mit der ausgewählten Probe nicht wiederholen lassen. Bei der Feuchtemessung wird die 20-g-Probe getrocknet und die zu prüfende Größe ist ab-

schließend verloren. Für die Verdichtbarkeit wäre es kurzzeitig vorstellbar, den Probenkörper für eine Wiederholung der Längenmessung erneut zu verwenden. Ersatzweise wird daher ein festes Längenmaß als kalibrierbare Referenz verwendet. Dann lassen sich in der Tat traumhafte Werte erzielen, die weit über der Marke von $2,0$ liegen. Gleiches gilt für die Gewichtsmessung im thermisch-gravimetrischen Feuchtemessverfahren. Reduziert auf die Reproduzierbarkeit eines Gewichtswertes vom selben Prüfkörper, lassen sich auch hier Kennwerte im sicheren Bereich über $2,0$ erzielen.

Der Einsatz digitaler Auswerte-Elektronik verbessert hochgradig die notwendigen Genauigkeiten, weil sie Digital/Analog-Wandler verwenden, die problemlos 2^{16} entsprechend 65.536 Schritte erreichen. Sie können im einstelligen μm -Bereich Längen darstellen.

3. Offenbar werden jedoch ganz andere Probleme: die aufgezeigten Streuungen stammen nicht unbedingt aus dem Gerät selbst, sondern aus der Probe.

- die Probenaufbereitung bis hin zur Befüllung der Hülse zeigt von einem Prüfer zum anderen Abweichungen auf. Die Art des Siebens und der Befüllung erzeugt die großen Streuungen. Das ist speziell ein Problem bei der Bestimmung der Verdichtbarkeit und analog dazu des Schüttgewichtes.
- Die Homogenität ist nicht gegeben. Gerade bei einer 20-g-Probe für die Feuchtemessung erzeugt bereits ein kleines nasses Knöllchen große Werteunterschiede. Der Mischer bekommt bei dieser Betrachtung eine besondere Bedeutung, denn die geforderten geringen Standardabweichungen müssen sich minimal auf eine gesamte Charge übertragen lassen. Bei der Betrachtung des schwächeren Bestimmungsansatzes für die Maschinenfähigkeit mit einem Indexwert von $c_m = 1,67$ und einer Verdichtbarkeitstoleranz von $T = 4 \%$ darf die Standardabweichung höchstens $s_g = 0,6 \%$ (!) (Tabelle 7) betragen. Ca. 68% aller Chargen dürfen hinter dem Mischer nur noch $0,6 \%$ vom Mittelwert abweichen. Das bedeutet für die Homogenität einer Mischung, dass ihre Toleranz diese $0,6 \%$ nicht überschreiten darf. Würde man die Überlegungsansätze über die zu akzeptierenden Streuungen auch hier übertragen, würde sich der Vorgabewert nochmal deutlich verkleinern. Entsprechendes gilt für die Feuchtemessung, wenn deren Toleranz für $T = 0,2 \%$ angegeben wird, dann darf der Mittelwert der repräsentativen Probe pro Charge für ca. $2/3$ aller Mischungen nicht $s_g = 0,03 \%$ (!) (Tabelle 7) überschreiten. Entsprechendes gilt dann für die Toleranz für die Homogenität einer Mischung.
- Spinnt man den Gedankenfaden weiter, dann bedeutet eine Standardabweichung $s_g = 0,6 \%$ für die Verdichtbarkeit in der Messhülse von 100 mm , eine Streuung von $0,6 \text{ mm}$. Übliche Formsande haben ein mittleres Korn von ca. $0,24 \text{ mm}$, womit höchstens 3 Sandkornlagen diese Standardabweichung darstellen. Die Verdichtbarkeit ist eine Eigenschaft, die stark geprägt wird vom Feuchtegehalt, da der Wasserfilm an der Oberfläche die adhäsiven Klebeeefekte bewirkt. Dieses Zahlenspiel lässt sich auch für die Wasserzugabe darstellen. Als Faustformel wird gerne eine einfache Relation zwischen Feuchte und Verdichtbarkeit genommen, indem für eine Veränderung der Verdichtbarkeit um 3% die Wasserzugabe um $0,1 \%$ angepasst werden muss. Ausgehend von der obigen Standardabweichung $s_g = 0,4 \%$ Verdichtbarkeit, muss die Wasserzugabe um $0,013 \%$ angepasst werden, was für eine 1000-kg -Charge nur $0,13 \text{ l}$ bedeuten. Diese geringe Menge muss sich dann auch gleichmäßig verteilen.

4. Dieser Ansatz, die Toleranzen anzuheben, um die Indexgrößen einzuhalten, ist für den Anwendungsfall Laborprüfgeräte für den Formsand nicht übertragbar. Bei kritischer Betrachtung der vielen exemplarisch durchgerechneten Beispielzahlen wird erkennbar, dass für den Formsand mit seiner „grobkörnigen“ Struktur eine andere Relationsstruktur benötigt wird. Die Bearbeitungsmöglichkeiten für die Oberflächenbehandlung zur Maßhaltigkeit von metallischen Prüfkörpern erlauben diese anspruchsvollen Indexvorgaben. Die sicherlich zugespitzten Zahlen verdeutlichen Grenzen. Mit viel Aufwand werden Messgeräte mit sehr hoher digitaler Auflösung eingesetzt. Aber unser zu prüfendes Objekt, der Formsand, weist ganz andere Rauigkeiten auf und ist eben nicht mehr vergleichbar mit metallischen Oberflächen.

Viele Aufgaben stehen noch vor uns

Es ist unverkennbar, dass sich das eingeführte System der Fähigkeitsuntersuchungen für die Prüfmittel und für die Produktion in der Automobilindustrie nicht auf den Formsand in Gänze übertragen lässt. Eine angepasste und sinnvolle Arithmetik wird erforderlich, die dann in den Merkblättern mit Messtechnikbeschreibungen Eingang finden muss. Nur so kann sich der Gießer vor nicht erfüllbaren Ansprüchen schützen, die mathematisch-bürokratisch abgeleitet werden.

Der dahinter stehende Anspruch der Six Sigma-Philosophie einer kontinuierlichen Verbesserung wird konterkariert, weil diese Fähigkeitsindexe häufig einfach nicht angewendet werden. Fast schon hilflos wird der Anspruch reduziert: „Mir reicht der Trend, die echten Messwerte brauche ich nicht.“

Am Anfang dieser angepassten Betrachtungskette muss technologisch untersucht werden, wieviel Verdichtbarkeitstoleranz nötig ist, um die scharfen Maßhaltigkeitsangaben beim Motorenguss sicherzustellen. Mit welchem Grenzwert für die Verdichtbarkeit wird die Toleranz von 0,3 mm beim dünnwandigen Guss nicht mehr eingehalten? Das gilt gleichermaßen auch für die anderen Laborwerte, die häufig ermittelt werden – eine Untersuchung, die längst überfällig ist.

Sicherlich ist das keine Aufgabe, die von jeder einzelnen Gießerei erfüllt werden kann/muss. Hier ist die Wissenschaft gefragt. Wir brauchen endlich wieder Hochschul-institute, in denen mit Herzblut derartige Fragen auf dem Gebiet des bentonitgebundenem Formsandes aufgegriffen werden. Andernfalls bleibt diese Technologie in ihrer Entwicklung stehen und wird das gleiche Schicksal erleben wie die Korbmacherei.

Wolfgang Ernst, datec GmbH, Braunschweig

Literatur:

- [1] Wegner, R.: *Neue Entwicklungen und Produktionstechnologien im Motorenguss. Tagung Gießtechnik im Motorenbau, 05.02.2012, Magdeburg.*
- [2] Steinkemper, U.: *Neuartiges Prozess- und Qualitätsmanagement – Ringversuch – Vortrag Freiberg, 04.05.2010.*
- [3] Dietrich, E.; Schulze, A.: *Eignungsnachweis von Prüfprozessen. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2004.*
- [4] *Fähigkeitsnachweis von Messsystemen. Arbeitskreis im VDA, Weinheim, 2002.*