

Neuartige Verfahrensvarianten zur Herstellung von aerostatischen Führungsflächen

T. Erbe¹, M. Berg¹, R. Theska¹, C. Weber¹

¹ *Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion (IMGK)
Technische Universität Ilmenau*

1 Einleitung

Die Konstruktion von Maschinengestellen scheint sich auf den ersten Blick im Wesentlichen auf ein Dimensionierungsproblem reduzieren zu lassen. Dieses Vorurteil ist wahrscheinlich allgemein unzutreffend, ganz und gar falsch ist es jedoch im Präzisionsmaschinenbau, da hier das mechanische und thermische Verhalten des Gestells die wesentlichen Eigenschaften der Maschine, insbesondere deren Genauigkeit, maßgeblich beeinflussen und einen erheblichen Kostenanteil der Maschine darstellen.

Im vorliegenden Beitrag wird gezeigt, wie man ein komplexes Anforderungsprofil an ein Maschinengestell der Präzisionstechnik auf der Basis einer für dieses Anwendungsgebiet neuartigen Technologie (auch gekoppelt an einen hier neuartigen Werkstoff) durch DfX-Methoden in einen innovativen Entwurf umsetzen kann.

Im Einzelnen wird behandelt:

- Einführung einer neuartigen Technologie (auch gekoppelt an einen hier neuartigen Werkstoff) in die Gestellkonstruktion für Präzisionsmaschinen und -geräte, welche die Vorteile bisheriger Bauweisen miteinander kombiniert, d. h. insbesondere:

- Vergrößerung der Formenvielfalt von Gestellelementen
- Einhaltung der geforderten Formgenauigkeit
- für aerostatische Führungen geeignete Oberflächen
- gleichzeitig Minimierung bzw. Vermeidung spanender Nachbearbeitung

2 Anforderungen

Gestelle in der Präzisionstechnik müssen höchste Anforderungen in Bezug auf Geradheit/Ebenheit und Oberflächenqualität erfüllen. Diese ergeben sich im Wesentlichen daraus, dass das Gestell zugleich die Führungsfläche(n) für die bewegten Elemente der jeweiligen Maschine bereitstellt. Dadurch ergeben sich häufig Ebenheitsforderungen im Bereich weniger Mikrometer.

Als konstruktive Lösung kommen i. d. R. Gestelle aus Naturhartgestein (Granit) zum Einsatz, wobei die Führungsflächen geschliffen und geläppt sein müssen. Mögliche Alternativen sind die aus dem Werkzeugmaschinenbau bekannten metallischen Werkstoffe wie Stahl oder Gusseisen.

Die Vorteile von Naturhartgesteinelementen in der Präzisionstechnik sind die vernachlässigbar kleinen Eigenspannungen, die daraus resultierende gute Langzeit-Formstabilität sowie günstige thermische Eigenschaften. Der Nachteil sind die aufgrund der großen Härte beschränkten Bearbeitungsmöglichkeiten, aber auch die je nach Abbaugbiet stark schwankenden Eigenschaften und Verfügbarkeit des Rohmaterials. Dadurch sind Gestelle aus Naturhartgestein auf einfache Geometrien beschränkt und im Hinblick auf Materialbeschaffung und Bearbeitung sehr kostenintensiv.

Der Vorteil metallischer Werkstoffe ist die durch das Urformen erzielbare geometrische Komplexität, die auch positive Sekundäreffekte ermöglicht (z.B. Funktionsintegration, dadurch weniger Bauteile, geringere Kosten). Allerdings müssen Gestelle aus metallischen Werkstoffen i. d. R. thermisch nachbehandelt und mechanisch nachbearbeitet werden, um die geforderte Oberflächenqualität zu erzielen und innere Spannungen abzubauen, wie auch die aus letzteren folgenden Formabweichungen durch eine schleifende Nachbearbeitung wieder zu beseitigen.

Besondere Anforderungen werden an aerostatische Führungsflächen gestellt. Maßgeblicher Parameter ist hierbei die Einhaltung eines bestimmten Luftspaltes h zwischen der Oberfläche/Führungsfläche des Gestells und dem aerostatischen Führungselement. Die Höhe des Luftspaltes h beträgt etwa 5

bis 7 μm . Um Schäden an der Führungsfläche oder dem Führungselement zu verhindern, muss die Führungsfläche folgende Anforderungen erfüllen:

- Ebenheitsabweichungen der Führungsfläche unter dem Führungselement müssen kleiner als 50% der Höhe des Luftspaltes h sein [1]. Daraus ergibt sich eine erforderliche Ebenheit von $<2,5 \mu\text{m}$.
- An die Rauheit gibt es unterschiedliche Anforderungen. Häufig wird eine gemittelte Rautiefe R_z von maximal $1/3$ des Luftspaltes h gefordert [2]. Der Luftführungselemente-Hersteller *New Way Air Bearing* fordert einen Mittenrauwert R_a der Oberfläche von $0,37 \mu\text{m}$ oder besser [1].



Abbildung 1: Rauheitsprofil einer aerostatischen Führungsfläche aus Naturhartgestein

Diese Werte gelten jedoch nur für „gleichmäßig“ raue Oberflächen. Oberflächen mit wenigen Spitzen führen zu kleinen R_a -Werten, können das Luftführungselement jedoch stark beschädigen. Täler reduzieren nur unmerklich die Tragfähigkeit des Führungselementes und sind daher unkritisch. Es ist daher unabdingbar, die Topographie der Rauheit im Detail zu beachten.

Eine aerostatische Führungsfläche kann grundsätzlich in drei Bereiche unterteilt werden (siehe Abbildung 2: Unterteilung einer aerostatischen Führungsfläche und Maschinengestell):

- In einen Oberflächenbereich (im Weiteren nur „Oberfläche“ genannt), auf dem das aerostatische Führungselement gleitet. Dieser muss glatt genug sein, um Schäden am aerostatischen Führungselement zu verhindern. Seine Dicke beträgt wenige Mikrometer, einschließlich aller Formabweichungen (Rauheiten und Welligkeiten).
- In das darunter liegende Volumen des Führungskörpers (im weiteren „Supportvolumen“ genannt), welches die Leitgerade bzw. Leitebene definiert und z. B. Wanderlasten aufnimmt sowie

- in das eigentliche Maschinengestell, welches die Führungsfläche mit der Umgebung verbindet und innere Kräfte nach außen bzw. umgekehrt leitet.

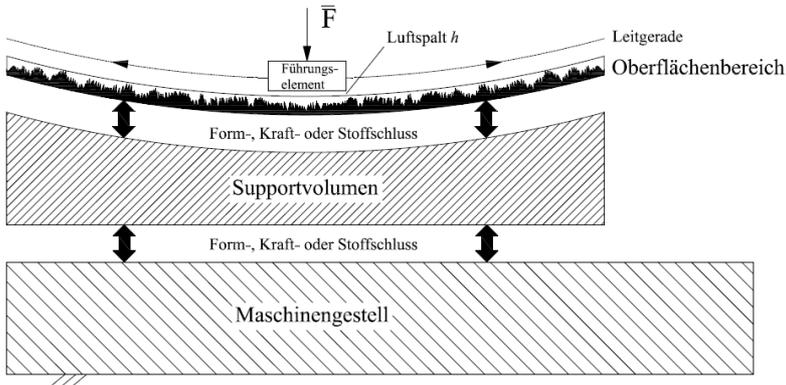


Abbildung 2: Unterteilung einer aerostatischen Führungsfläche und Maschinengestell

Für die Betrachtung des Bearbeitungsaufwandes ist der Oberflächenbereich von Bedeutung. Veränderungen der Leitebene infolge von Wanderlasten werden im Allgemeinen durch ein möglichst steifes Supportvolumen abgefangen, wobei eine hohe Masse gleichzeitig die Bewegungsamplituden durch in den Führungskörper eingeleitete Kräfte mindert.

3 Lösungsansatz

3.1 Werkstoff

Ein alternativer Ansatz muss eine dem Gießen ähnliche Formenvielfalt ohne nachteilige Schwindung ermöglichen und gegenüber der spanenden Bearbeitung Kosten reduzieren. Die mechanischen, vor allem aber die thermischen Eigenschaften müssen zudem vergleichbar oder besser denjenigen von Naturhartgestein (Granit) sein. Es müssen also als günstig erachtete Werkstoffeigenschaften beibehalten und die als ungünstig erachteten technologischen Eigenschaften durch geschickte Wahl der Fertigungsprozess- und Konstruktionsmerkmale erreicht werden.

Um eine vergleichbare Formenvielfalt erreichen zu können wurden Urformverfahren und die Ursachen des Schwindens beim Gießen von Metallen untersucht. Als kritisch erwies sich dabei der Temperaturgang infolge der Phasenumwandlung. Dieser führt sowohl zu Geometrieänderungen, als auch

zu inneren Spannungen im Material und bedingt aufwändige und teure Gießformen/Gießformwerkstoffe. Weiterhin überschreiten urgeformte Oberflächen die geforderten Oberflächenkennwerte deutlich, da schon die thermisch belasteten Formflächen nicht die geforderte Oberflächenqualität aufweisen.

Alternativen sind mineralische Gussmassen wie Reaktionsharzbeton oder hydraulisch gebundener Beton, die beim Aushärten nur einem geringen Temperaturgang unterliegen und damit einfachere und günstigere Formwerkstoffe und -elemente mit geringer Oberflächenrauheit erlauben. Sowohl Reaktionsharzbeton (im Weiteren werden ausgehärtete Elemente als „Mineralguss“ bezeichnet, die Bezeichnung „Reaktionsharzbeton“ wird hingegen ausschließlich für die Füllmasse genutzt) als auch hydraulisch gebundener Beton bieten prinzipiell diese Vorteile sowie dem Naturhartgestein vergleichbare Eigenschaften.

In Vorarbeiten ([3], [4] u. a.) wurde Mineralguss als Alternativwerkstoff insbesondere im Werkzeugmaschinenbau betrachtet. Obgleich grundsätzlich geeignet, werden Präzisionsflächen mit Mineralguss entweder in einem zweistufigen Prozess oder durch nachträgliches Schleifen hergestellt. Da zudem die Aufbereitung der Füllstoffe des Reaktionsharzbetons durch aufwändige Trocknungen gekennzeichnet ist, wurde im Hinblick auf einen einfachen Herstellungsprozess hydraulisch gebundener Beton näher betrachtet

Hydraulisch gebundener Beton ist ein 3-Komponenten-System, aus Zement, Zuschlagstoffen und Wasser. Zement ist ein Bindemittel, das durch eine chemische Reaktion mit Wasser durch Hydratation erstarrt. Durch Zugabe von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln ändern sich die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Beton. Neue Entwicklungen besonderer Zusatzstoffe und Zusatzmittel resultieren in Beton, wie Ultra-Hochleistungsbeton (UHPC) oder selbstverdichtendem Beton (SVB) als 5-Komponenten-System **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

Für die Untersuchungen in dieser Studie wurde SVB als Werkstoff gewählt. Er ist aufgrund seines guten Fließverhaltens im nicht abgebundenen Zustand für das Gießen komplexer Maschinengestellgeometrien geeignet und entlüftet ohne äußere Energiezufuhr (Rütteln, Temperieren).

Für die Untersuchungen wurde in Abstimmung mit der Bauhaus Universität Weimar eine besondere Art SVB entwickelt. Die Materialeigenschaften dieses Betons zeigt Tabelle 1: Materialeigenschaften von SVB im Vergleich zu Normalbeton und Naturhartgestein. Aufgrund der nahezu identischen Materialzusammensetzung sind die Eigenschaften von SVB und Normalbeton vergleichbar. Die verglichen mit Naturhartgestein geringeren Festigkeitswerte

sind für die Verwendung im Präzisionsbereich unkritisch, da in diesem die Festigkeitsgrenzen der Werkstoffe ohnehin nicht ausgereizt werden. Die geringfügig höhere thermische Dehnung ist zwar ungünstig im Hinblick auf die thermische Stabilität, ermöglicht es jedoch durch thermisch bedingte Dehnungsgradienten eingeprägte Spannungen bei Verbundteilen (insbesondere mit Stahl) zu vermeiden.

Tabelle 1: Materialeigenschaften von SVB im Vergleich zu Normalbeton und Naturhartgestein

Materialeigenschaft	Druckfestigkeit	Biegefestigkeit	E-Modul	Dichte	thermischer Ausdehnungskoeffizient	Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit
	mechanisch				thermisch		
Einheit	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kN/mm ²]	[g/cm ³]	[10 ⁻⁶ /K]	[J/kg·K]	[W/m·K]
SVB	58	3,6	33	2,2	11,9	k.A.	1,77
Normalbeton	10-60	2-8	30-50	2,0-2,4	6-14	0,9-1,0	1,7-2,1
Naturhartgestein	250-360	10-35	60-95	2,9-3	5-7,5	0,85	1,7-3,5

Ein weiterer Vorteil von Beton gegenüber Mineralguss ist die vergleichsweise einfache Entsorgung von Fertigungsabfällen und ein besser vorhersehbares Verformungsverhalten unter Einfluss von (auch kleinen) thermischen Feldern.

Versuche Beton für Gestellsysteme zu verwenden gab es insbesondere im Werkzeugmaschinenbau schon zuvor. Die Anwendungen blieben dabei auf Maschinengestelle bzw. das Supportvolumen beschränkt. Die Führungsflächen wurden hierbei nicht aus Beton sondern aus Naturhartgestein oder metallischen Werkstoffen realisiert.

3.2 Technologie

Ziel der Studie war es, durch Urformen von Beton eine für aerostatische Führungselemente geeignete Oberfläche zu schaffen. Das zu entwickelnde Verfahren wie auch die Werkstoffe der Gießformen sollten dabei eine einfache und kostengünstige Fertigung ohne, oder zumindest mit minimalem Schleif-/Polieraufwand ermöglichen.

Das Erzeugen einer Führungsfläche ist direkt durch den Beton an einem hochpräzisen Gießformelement (dieses wird „Abformlehre“ genannt → man spricht deshalb von „Abformen“) oder durch Einbetten geeigneter (Führungs-) Elemente möglich (vgl. Abbildung 3).



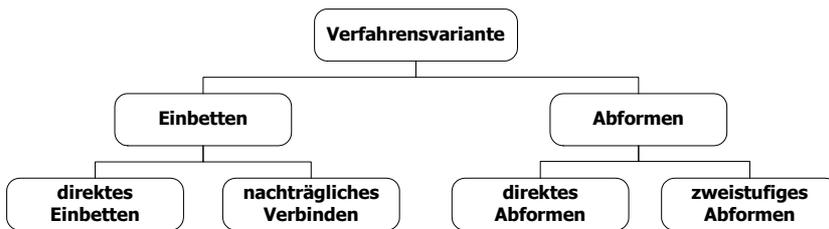


Abbildung 3: Übersicht über mögliche Verfahrensvarianten für das Abformen und das Einbetten von Führungsflächen

Das Gießen von Beton ist mit dem von metallischen Werkstoffen insofern vergleichbar, dass auch beim Gießen von Beton die Zuführung der Vergussmasse und die Entlüftung der Form wesentliche Fehlerquellen darstellen. Durch das Gießen bei Raumtemperatur und die trotz exothermer Abbinde-reaktion kleinen Temperaturerhöhung sind die Anforderungen an die thermische Stabilität der Werkstoffe der Gießformen (im Weiteren Formwerkstoffe) gering. Um jedoch eine Oberfläche geringer Rauheit zu erhalten ist es wesentlich auf die Entlüftung der Form zu achten, da sonst kleine Lufteinschlüsse entstehen, die zwar hinsichtlich der Festigkeit unproblematisch, doch als Poren an der Oberfläche für eine aerostatische Führungsfläche untragbar wären.

3.3 Abgeleitete Verfahrensrichtlinien

Die in Abbildung 3 gezeigten Verfahrensvarianten unterscheiden sich auch dahingehend, daß beim Abformen Rauheit und Ebenheit von der Abformlehre/ Gießform bestimmt werden, während beim Einbetten die Rauheit vom Einlegeteil abhängt.

Da die in der Vergussmasse eingeschlossene Luft infolge der Dichteunterschiede entgegen dem Schwerfeld „nach oben“ entweicht bilden sich an der Oberseite sowie an Hinterschneidungen des Gussstücks, die das Entweichen der Luft ver- oder behindern, Blasen und Poren. Hieraus leitet sich ab:

- Flächen mit hohen Anforderungen an die Oberflächenqualität möglichst weit unten in der Form anordnen (vgl. Abbildung 4)
- Hinterschneidungen die das entweichen der Luft behindern vermeiden und Seitenwände Schrägstellen

Um eine Nachbearbeitung des Betonkörpers zu vermeiden bietet es sich an, die geringen Temperaturen beim Gießprozess, der Formteile aus Stahl, Holz, Glas oder Kunststoff möglich macht zu nutzen und weitere Elemente und Funktionen (Kabelschächte, Medienzuleitungen, ggf. elektrische Leitungen, Gewindeanker, etc.) direkt in den Betonmonolithen zu integrieren.

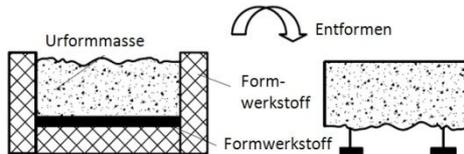


Abbildung 4: Prozess-Variante für das „über Kopf“ Abformen

Da die hierfür nötigen Einlegeteile und Formelemente meist nur einen geringen Teil der Gesamtkosten ausmachen und eine Nachbearbeitung meist mit höheren Kosten verbunden ist, empfiehlt es sich:

- so viele Funktionen wie möglich in den Betonkörper zu integrieren
- Formelemente anzustreben, die nicht wieder entfernt werden müssen → Prinzip der verlorenen Form
- Formelemente mit hohen Anforderungen an die Oberflächengüte nur dort einzusetzen wo diese am späteren Gussstück gefordert ist.

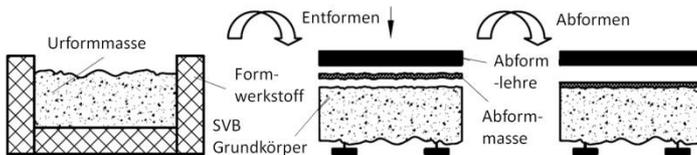


Abbildung 5: Prozess-Variante für das zweistufige Abformen

Ist ein „über Kopf“ Abformen aufgrund der geforderten Bauteilkomplexität nicht möglich oder lassen sich die beim Gießen auftretenden Verformungen der Formelemente nicht hinreichend genau bestimmen, bietet sich das zweistufige Abformen an (vgl. Abbildung 5).

4 Experimente

Für die in dieser Studie vorgestellten Untersuchungen wurden alle Probekörper „über Kopf“ abgeformt. Als Abformlehre für die spätere Führungsfläche

dienten Naturhartgestein und Glas, die restlichen Formteile waren aus Kunststoff oder Faserverbundelementen. Anschließend wurden die SVB-Proben sechs Tage lang (entsprechend [6]) für die Hydratation in einem Wasserbad feucht gehalten. Aufgrund der unterschiedlichen Werkstoffe der Abformlehren, der Messzeiten und den Abmessungen der Probekörper (Balken von 1500 mm x 80 mm x 160 mm) wurde die Zahl der Proben auf drei begrenzt.

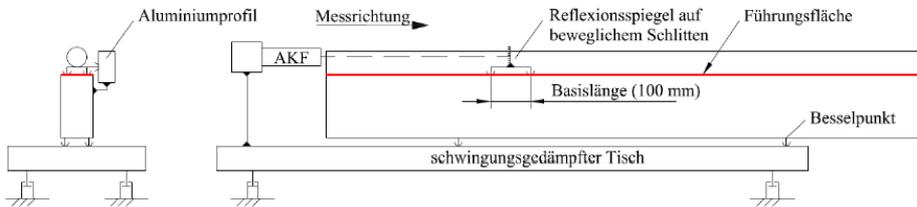


Abbildung 6: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus

Diese Anzahl erlaubt keine statistisch gesicherten Messergebnisse, liefert jedoch eine erste Vorstellung über die erreichbare Abformqualität sowie die durch die gewählten Verfahren und Werkstoffe erreichbare Ebenheit und deren Änderung.

Für die Beurteilung der Eignung eines Formwerkstoffes und der Abformbarkeit wurden in ersten Experimenten bewertet:

- Geradheit eines Probekörpers und deren zeitliche Änderung sowie
- Rauheit der SVB-Oberflächen nach der Herstellung, optisch und messtechnisch

Der Fokus der Untersuchungen lag dabei zunächst auf den erreichbaren Rauheitswerten, die Messungen zur Ebenheit der Probekörper im Langzeitversuch dauern an (vgl. Abbildung 6).

5 Ergebnisse

Die Untersuchungen der abgeformten SVB-Oberflächen ergaben maximale Rauheitswerte für R_a von rund $3 \mu\text{m}$ und R_z rund $5 \mu\text{m}$. Diese Werte waren unabhängig von der Kontaktzeit zwischen beiden Elementen. Die Oberflächenkennwerte der SVB-Oberflächen waren dabei stets schlechter als die der verwendeten Abformlehren. Es zeigte sich weiterhin, dass der flüssige SVB beim Betonieren die Oberflächenfehler der Formen hochpräzise abbildet,

so konnten die Täler/Krater/Poren der verwendeten Naturhartgesteinform als Spitzen auf der SVB-Oberfläche abgeformt werden.

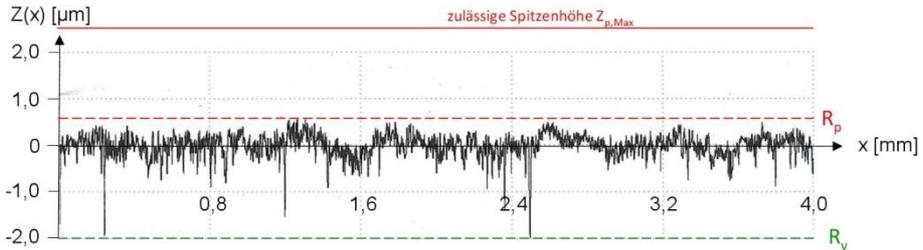


Abbildung 7: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n=5,6$ mm mit $R_a=0,21$ μm und $R_z=2,1$ μm der abgeformten SVB-Oberfläche auf Glas



Abbildung 8: Oberflächenprofil der Messstrecke $l_n=5,6$ mm mit $R_a=0,51$ μm und $R_z=3,4$ μm der abgeformten SVB-Oberfläche auf Naturhartgestein

Durch das Abformen von SVB an Glas wurden sehr geringe Rauheitswerte ($R_a=0,21$ μm und $R_z=2,1$ μm , vgl. Abb. 7), erreicht, die lediglich feine, dünne Spitzen einer Höhe von <1 μm aufweisen. Kritische Rauheitswerte verursacht durch isolierte Spitzen und Krater ergaben sich beim Abformen an Naturhartgestein (vgl. Abbildung 8).

Die Geradheit der Probekörper änderte sich zu Anfang stark (vgl. Abbildung 9). Als Ursache hierfür wird das Schwinden des Probekörpers infolge des Aushärtens vermutet. Die Messwerte änderten sich vom 56. Tag bis zum 167. Tag (letzter Stand der Messungen, Messungen zum Langzeitverhalten dauern an) nach dem Gießen jedoch nur noch innerhalb der Messunsicherheit von ± 3 μm .

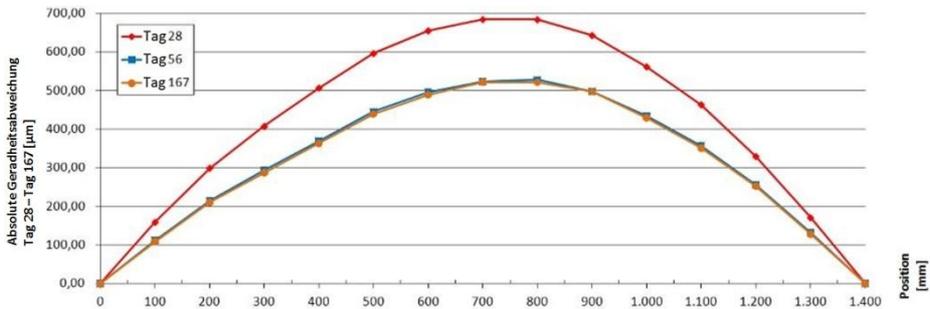


Abbildung 9: Profil des Betonprobekörpers zu verschiedenen Messzeitpunkten

6 Abgeleitete Gestaltungsrichtlinien

Es lässt sich weiter feststellen, dass um die Vorteile des Urformens von Beton zu nutzen möglichst viele Funktionen direkt in das Betonteil zu integrieren sind. Dabei ist u. a. zu beachten, dass:

- je mehr Abformungen mit einer Schalung möglich sind, der Schalungskostenanteil pro Gussteil sinkt,
- die Rüstkosten durch komplexe und mehrteilige Schalungen steigen. Wenn möglich sollten einfache Geometrien mit wenigen und ebenen Formteilungsebenen angestrebt werden.
- Die Kosten der Gießform mit Zahl und Anforderungen an die Lagetoleranzen der Gießformelemente (auch der verlorenen) steigen.

Um eine für eine aerostatische Führung geeignete Fläche zu erreichen ist es wesentlich, eine geringe Rauheit zu erzielen, hierfür erwies sich Glas als für die Abformlehre geeigneter Werkstoff. Formabweichungen die gegenüber den Abmessungen des Luftlageres großperiodisch sind können korrigiert oder nachgeschliffen werden. Die Messwerte zur Ebenheit lassen einen Abtrag von ca. 500 µm der Oberfläche erwarten. Hierbei ist jedoch die zeitliche Änderung der Geometrie zu berücksichtigen.

7 Zusammenfassung/Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zeigen, dass mit Beton, insbesondere mit selbstverdichtendem Beton urformend Flächen hergestellt werden können, die die Anforderungen an die Rauheiten für aerostatische Führungsflächen erfüllen. Die Ebenheitsabweichungen der untersuchten Geometrien waren langperiodisch gegenüber den Abmessungen eines aerostatischen Führungselementes.

Ihnen kann entweder durch Korrekturtabellen oder geringfügiger Nachbearbeitung Rechnung getragen werden.

Durch Verwendung von selbstverdichtendem Beton und unter Berücksichtigung einer geschickten Anordnung der Flächen mit hohem Genauigkeitsanspruch in der Gussform lassen sich auch komplexe Maschinengestellgeometrien mithilfe verschiedener in Anschaffung und Bearbeitung günstiger Gießformwerkstoffe realisieren.

Danksagung

Die Autoren danken den Mitgliedern des Sonderforschungsbereiches 622 „Nanomess- und positioniermaschinen“ sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft für ihre Unterstützung.

Literatur

- [1] NEW WAY AIR BEARINGS: *New Way Application and Design Guide*. Version 2006. <http://www.newwayairbearings.com/Detailed-Product-Information>, Abruf: 20.09.2009
- [2] Donat, H.: *Aerostatische Führungen und Luftlagerungen – Berechnungen, Konstruktion und Einsatz aerostatischer Führungen in Maschinen- und Präzisionsgerätebau*. Göttingen: Cuvillier Verlag , 2006
- [3] Jackisch, U.–V.: *Mineralguss für den Maschinenbau*. Verlag Moderne Industrie, Kassel 2002
- [4] Erbe, T.; Król, J.; Theska, R: *Mineral casting as material for machine base-frames of precision machines*. Proceedings of the twenty-third annual meeting of the American Society for Precision Engineering and the Twelfth ICPE. October 2008
- [5] Wesche, K.: *Baustoffe für tragende Bauteile*. Band 2. 3rd ed. Wiesbaden und Berlin: Bauverlag GmbH, 1993 (in German)
- [6] Norm DIN 1048-5 Juni 1991 – Prüfverfahren für Beton – Festbeton, gesonderte hergestellte Probekörper (DIN 1048-5-6:1991)