

FEHLERTOLERANTE GUSSSTÜCKGESTALTUNG

*Roland Hartmann, Vladimir Korovin, Serguei Poliakov, Viktor Popkov
TU Bergakademie Freiberg*

Kurzfassung

Die Aufgabe bestand darin, Gussstücke mit definierter Dichteverteilung herzustellen. Hierzu musste ein mathematisches Speisungsmodell entwickelt und ein System für die inverse Speisergenerierung geschaffen werden. Es wurde von einem Kugelmodell des Gusskörpers ausgegangen und ein Speisungsgraph definiert, mit dessen Hilfe die Speisung des Gussstückes simuliert werden kann. Auf diese Weise ist es gelungen, Speisersysteme für beliebig geformte Gussstücke, vorerst nur aus Stahlguss, so zu gestalten, dass der Fertigungsaufwand durch Tolerierung von Dichtefehlern an vorausbestimmten Stellen des Gussstückes erheblich gesenkt werden kann.

1 Einleitung

Das wohl größte Problem bei der Gussteilfertigung ist die Beherrschung der im Erstarrungsintervall auftretenden sprunghaften Kontraktion der meisten Gusswerkstoffe. Wenn man aber davon ausgeht, dass Gussstücke in vielen Fällen überhaupt nicht durchgängig von höchster Qualität sein müssen, sondern dass durchaus in manchen Querschnitten gewisse Schwindungsporositäten zulässig sein können, gelangt man logischerweise zur Strategie der fehlertoleranten Gussstückkonstitution. Das heißt, der Aufwand für das energieintensive Speisersystem soll gezielt vermindert werden, indem lokal auf unnötig hohe Dichteanforderungen verzichtet wird. Dazu müssen im wesentlichen zwei Aufgaben gelöst werden:

1. Es muss mit einiger Sicherheit vorausberechnet werden können, an welchen Stellen des Gussstückes bei gegebener Konstruktion in welchem Ausmaße Porositäten zu erwarten sind.
2. Das Speisersystem muss so ausgelegt werden können, dass es diese Porositäten gezielt, d. h. an definierter Stelle in definiertem Maße, beeinflusst.

Die Lösung dieser Aufgaben ist mit einem generischen Verfahren möglich, dessen Entwicklung im folgenden am Beispiel von Stahlguss vorgestellt wird.

2 Prognose von Schwindungshohlräumen in Gussstücken

Die bisher bekannten Methoden zur Speiserberechnung gehen im allgemeinen davon aus, dass Schwindungshohlräume im Gussstück unbedingt ausgeschlossen werden müssen, dass also die Speisung 100%ig gewährleistet sein muss [1]. Deswegen sind hierbei auch keine Kompromisslösungen vorgesehen. Diese Strategie hat dadurch oftmals eine Überdimensionierung der Speisersysteme zur Folge.

Eine selektive Tolerierung von Schwindungshohlräumen setzt dagegen voraus, dass die Verteilung der Querschnittsdichte im Gussstück ziemlich genau berechnet werden kann. Diese Aufgabe wurde prinzipiell gelöst. Die Lösung beruht auf dem Kugelmodell des Gussstückes, das schon in [2] beschrieben wurde. Demgemäß versteht sich das Gussstück

als Hüllkörper einer unendlich großen Anzahl von Kugeln unterschiedlichen Durchmessers. Die Mittelpunkte benachbarter Kugeln haben demzufolge einen unendlich kleinen Abstand voneinander. Aus dieser infinitesimalen Betrachtungsweise wird nach Verringerung der Kugelanzahl auf einen endlichen Wert ein Nachbarschaftsgraph entwickelt, der durch die Anzahl und Größe der Kugeln, ihren Abstand voneinander und ihre gegenseitige Beziehung charakterisiert ist. Er besteht aus Knoten und Bögen (**Bild 1**). Die Knoten sind identisch mit den Kugelmittelpunkten, die Bögen verbinden benachbarte Knoten miteinander. Aus diesem Nachbarschaftsgraphen muss zur Abschätzung des Speisungserfolges ein Speisungsgraph abgeleitet werden [2].

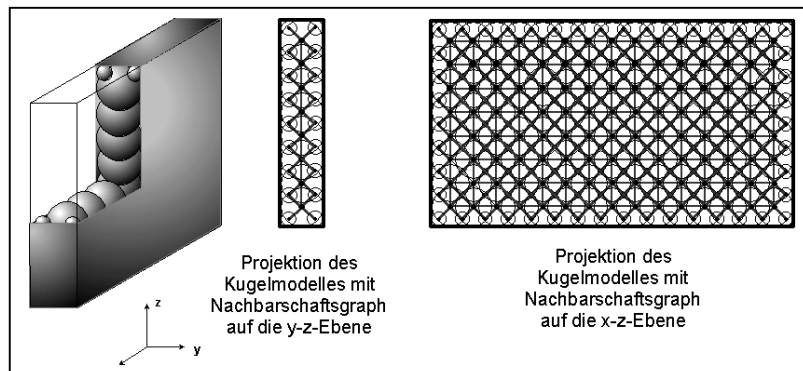


Bild 1: Kugelmodell und Nachbarschaftsgraph für eine Platte

Zu diesem Zweck wird zunächst angenommen, dass alle Oberflächen des Gussstückes, die nicht durch technologische oder konstruktive Restriktionen davon ausgeschlossen worden sind, für das Ansetzen von Speisern maximaler Wirkung zur Verfügung stehen. Die gesamte Oberfläche des Gussstückes wird also in speisungstechnisch erlaubte und verbotene Bereiche unterteilt. Die erlaubten Bereiche wiederum werden bezüglich des Ansetzens von Speisern in mehr oder weniger gut geeignete Flächen unterschieden. Da die Schwerkraft die Speisung bekanntermaßen unterstützt, wird davon ausgegangen, dass die Speiser möglichst an hoch gelegenen Gussstückoberflächen angebracht werden sollten. Die Bestimmung der speisungstechnisch günstigsten Lage des Gussstückes in der Gießform erfolgt durch Berechnung des Hauptspeisungsvektors \vec{w} aus den Erstarrungszeitgradienten der Gussstückkugeln [2]. Nachdem nun die günstigste Speiseransatzfläche ermittelt wurde, wird diese gesamte Fläche zur speisenden Fläche erklärt.

Die Menge aller Kugeln im Gussstück besteht aus drei Teilmengen:

- K_D Menge der Kugeln, die an der speisenden Fläche anliegen und andere Kugeln speisen können, die Donatorenkugeln;
- K_T Menge der Kugeln, die sowohl speisende wie auch gespeiste Kugeln sein können, die Transitorenkugeln;
- K_A Menge der Kugeln, die keine anderen Kugeln speisen können, die Akzeptorenkugeln.

Dem Aufbau des Speisungsgraphen liegt das Prinzip der gerichteten Erstarrung zu Grunde (**Bild 2**). Er konstituiert sich dadurch, dass er immer den Weg des Erstarrungszeitgradienten zwischen benachbarten Kugeln, beginnend bei den Donatorenkugeln, sucht. Alle Bögen des Nachbarschaftsgraphen, die nicht in Richtung des Erstarrungszeitgradienten zeigen, werden entfernt. Jede Kugel des Gussstückes hat dadurch jeweils eine Verbindung zu einer Donatorenkugel bzw. ist selbst eine Donatorenkugel, wie auch jede Kugel eine Verbindung zu einer Akzeptorenkugel aufweist bzw. selbst eine Akzeptorenkugel ist. Die Kette von Kugelmittelpunkten entlang des Erstarrungszeitgradienten zu einer Donatorenkugel heißt „Donatorenkette“ und demgemäß die Kette entlang des Erstarrungszeitgradienten zu einer Akzeptorenkugel „Akzeptorenkette“.

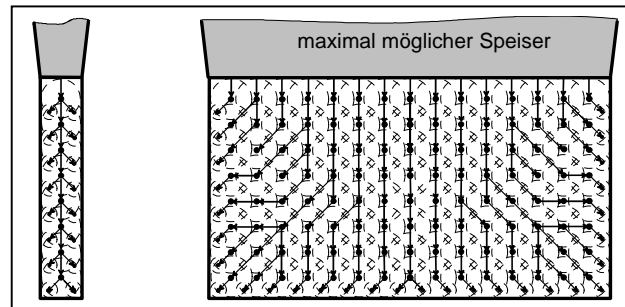


Bild 2: Speisungsgraph für eine Platte

Jeder Kugel kann ein Modul $M(x)$ zugeordnet werden, der die Abkühlungsbedingungen im Mittelpunkt der Kugel charakterisiert. Aus der Ableitung dM/dx des Moduls lässt sich die Dichtekennzahl α [2] und damit auch die Gütestufe, soweit sie Schwindungshohlräume betrifft, berechnen.

Entspricht die auf diese Weise ermittelte Qualitätsverteilung im Gussstück nicht den Mindestanforderungen, muss die speisende Oberfläche bzw. die Anzahl der Donatorenkugeln vergrößert werden. Es sind dann also Oberflächenbereiche des Gussstückes als Speiseransatzflächen einzubeziehen, die in erster Näherung wegen technologischer Probleme (z. B. gekrümmte Flächen) ausgeschlossen waren. Dieser Vorgang wiederholt sich eventuell so lange, bis alle erlaubten Flächenbereiche als speisende Flächen genutzt werden. Wenn dann die Qualitätsanforderungen immer noch nicht erfüllt werden, lässt sich das betreffende Gussstück allein durch Speisereinsatz nicht einwandfrei fertigen und es müssen andere Mittel zur Sicherstellung der gerichteten Erstarrung vorgesehen werden.

3 Generierung des Speisersystems

Nachdem sichergestellt ist, dass das betreffende Gussstück überhaupt zu der geforderten Qualität gespeist werden kann, müssen nun Disloziierung und Auslegung des Speisersystems vollzogen werden. Dabei wird wie folgt vorgegangen. Es wird zunächst diejenige Kugel im Gussstück gesucht, deren Dichtewert α die geringste Differenz zu dem geforderten Wert aufweist. Von dieser Kugel aus wird entlang des Erstarrungszeitgradienten die Donatorenkette bis zur Donatorenkugel bestimmt.

Aus dem Querschnittsmodul der Donatorenkugel kann der notwendige Modul des Speisers berechnet werden. Die Auslegung der Anschlussfläche des Speisers hängt von ihrer Konfiguration ab. Sie ist so zu positionieren, dass sie in ihrer Gesamtheit auf der speisenden Oberfläche des Gussstückes liegt.

Unter Verwendung dieses ersten diskreten Speisers wird die daraus resultierende neue Dichteverteilung im Gussstück berechnet und die Kugel gesucht, die unter den neuen Bedingungen am schlechtesten gespeist wird. Entspricht der Dichtewert α dieser Kugel den Erfordernissen, ist der Generierungsvorgang beendet. Weist diese Kugel aber einen zu geringen Dichtewert auf, wird für diese Kugel die Donatorenkette zur ursprünglichen speisenden Oberfläche bestimmt und auf die betreffende Donatorenkugel ein zusätzlicher Speiser generiert. Diese Prozedur wird so lange fortgesetzt, bis alle Kugeln des Gussstückes den geforderten Mindestdichtewert besitzen.

Mit Hilfe des Speisungsgraphen läßt sich die Grenze zwischen den Speiserwirkungszonen bestimmen. Aus dem Volumen einer Speiserwirkungszone kann das Volumendefizit berechnet werden, das das Gießmetall in diesem Bereich während der Erstarrung erleidet. Es wird mit dem zulässigen Volumendefizit des Speisers verglichen und daraus eine eventuelle Vergrößerung des Speiservolumens ΔV_{s_i} abgeleitet.

Mit dieser inversen Strategie gelingt es, das Speisersystem in seiner Gesamtheit zu minimieren und für jede Kugel des Gussstückes die geforderte Mindestdichte zu erreichen. Auf diese Weise wird das Prinzip der fehlertoleranten Gussstückkonstitution realisiert, mit dem es möglich ist, Schwindungsporositäten zu planen.

4 Verifizierung

Zur Verifizierung des mathematischen Modells war es notwendig, einerseits experimentelle Untersuchungen durchzuführen, mit denen der Zusammenhang zwischen Speiserparametern und Gusswerkstoffdichte, also der Dichtekennzahl α , ermittelt werden konnte, und andererseits musste die Realitätsnähe der mit der entwickelten Strategie gewonnenen Ergebnisse an einem konkreten Gussstück nachgewiesen werden.

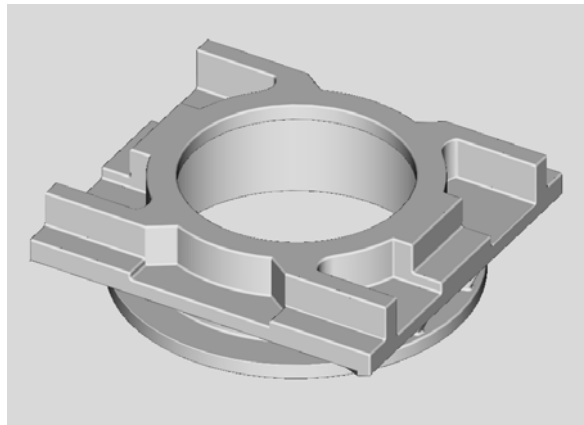


Bild 3 CAD-Modell des Gussstückes Lagergehäuse

Im Rahmen eines umfangreichen Untersuchungsprogramms wurden zahlreiche Probekörper in der Edelstahlwerke Schmees GmbH Pirna abgegossen, geröntgt und metallographisch analysiert. Aus den Analyseergebnissen wurden Funktionen abgeleitet, die für die Speiserberechnung erforderlich sind. Zur komplexen Verifizierung des entwickelten Berechnungssystems wurde ein Stahlgussteil ebenfalls aus der Produktion der Edelstahlwerke Schmees GmbH Pirna ausgewählt (**Bild 3**), das bisher nur unter Einsatz von Kühlkörpern gefertigt und schon in anderem Zusammenhang untersucht worden war [2].

Die erste Aufgabe bestand darin, für dieses Gussstück ein solches Speisersystem zu entwickeln, das seine Herstellung ohne Kühlkörper durchgängig in Gütestufe 1 (höchste Qualität) gestattete. Hierzu wurde wie folgt vorgegangen:

1. Berechnung des Hauptspeisungsvektors und Orientierung des Gussstückes in der Gießform (Festlegung oben/unten).
2. Generierung des Kugelmodells und des Nachbarschaftsgraphen und Definition der speisenden Oberfläche und der Restriktionen (**Bild 4a**).
3. Generierung des Speisungsgraphen und Prognose der Verteilung der maximal möglichen Dichte im Gussstück (**Bild 4b**).
4. Festlegung der der Gütestufe 1 gemäßen Dichteverteilung im Gussstück.
5. Generierung des masseminimalen Speisersystems für die Realisierung der Gütestufe 1 (**Bilder 4c, 4d**).
6. Abkühlungssimulation.
7. Abguss (**Bild 5**).

Mit der Röntgenprüfung wurde die qualitätsgerechte Fertigung des Gussstückes nachgewiesen. Die zweite Aufgabe bestand darin, das Speisersystem dieses Gussstückes gezielt zu vermindern. Hierzu wurde die Dichteverteilung so verändert, dass an ausgewählten Querschnitten des Gussstückes die geforderte Dichte auf einen noch zulässigen niedrigeren Wert verringert wurde (fehlertolerante Gussstückgestaltung). Ausgehend von dieser Dichteverteilung wurde analog zur ersten Aufgabe ein neues Speisersystem generiert und der Abguss vollzogen (**Bild 6**). Die Röntgenprüfung bestätigte die prognostizierte verminderte, aber noch zulässige Qualität des Gussstückes.

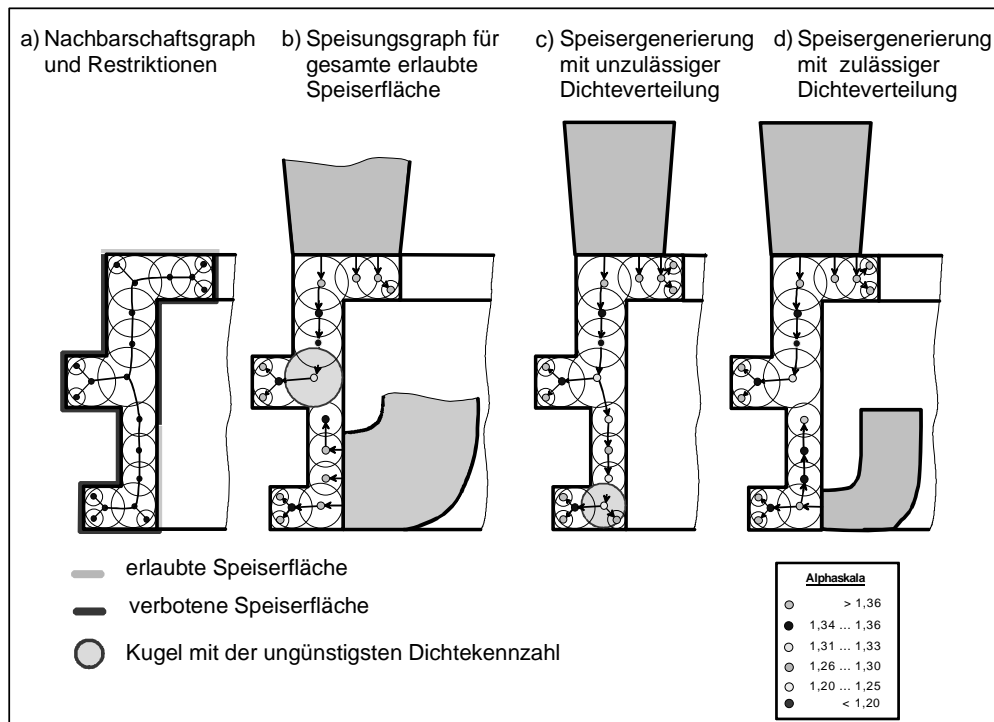


Bild 4: Generieren des Speisersystems für das Gussstück Lagergehäuse mit der zulässigen Dichtekennzahl $\alpha > 1,3$

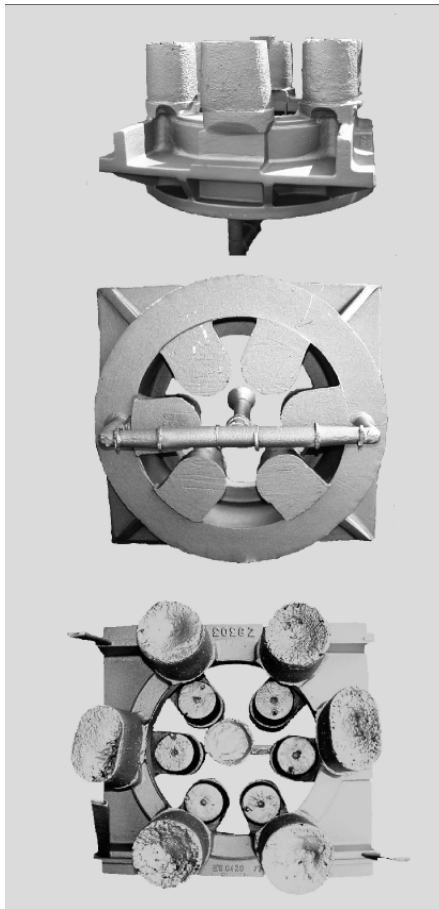


Bild 5: Gussstück Lagergehäuse mit Gieß- und Speisersystem, Qualitätsvariante mit gleichmäßig hoher Dichtekennzahl

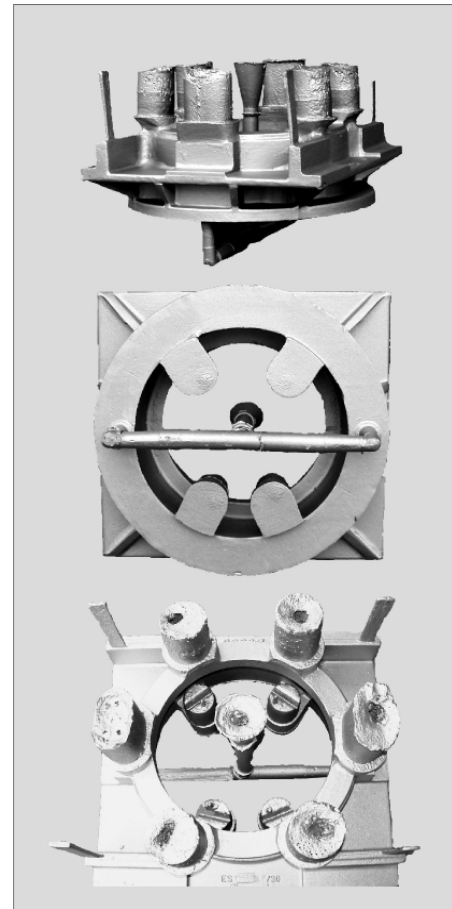


Bild 6: Gussstück Lagergehäuse mit Gieß- und Speiser system, Qualitätsvariante mit fehlertoleranter Verteilung der Dichtekennzahl

Auf diese Weise konnte erreicht werden, dass die geforderte Dichteverteilung im Gussstück mit einem um 50 % verringerten Speisersystem realisiert wurde. Damit ist die Leistungsfähigkeit der entwickelten Strategie nachgewiesen und die Aufgabe erfüllt.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Wlodawer, R.: Gelenkte Erstarrung von Stahlguss. Gießerei Verlag GmbH, Düsseldorf, 1992.
- [2] Hartmann, R., Poliakov, S., Popkov, V., Korovin, V., Badikov, G., Koinov, I., Martin, A.: Mehrkriteriale Gestaltgenerierung von Stahlgussteilen. Gießereiforschung 52(2000)2, S. 39-48.
- [3] Hartmann, R., Korovin, V., Poliakov, S., Popkov, V.: Fehlertolerante Gussstückkonstitution unter Verwendung automatisch generierter Speisersysteme. Gießereiforschung 53(2001)3, S. 122-129.

Prof.Dr.-Ing.habil.R. Hartmann, Dipl.-Ing. V. Korovin, Dr.-Ing. S. Poliakov, Dr.-Ing. V. Popkov
 Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung,
 Technische Universität Bergakademie Freiberg, 09596 Freiberg
 Tel.: 03731/392526, Fax: 03731/393658
 E-Mail: hartmann@imkf.tu-freiberg.de