

**Entwicklung und Erprobung einer Niederdruck-Gießeinrichtung für
Eisen-Kohlenstoff-Legierungen
und Untersuchungen zur gesteuerten Formfüllung**

Von der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik

der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

Dr.-Ing.
(Kurzform)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Peter Lippek
geboren am 18.04.1964 in Freiberg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Bast, Freiberg
Prof. Dr.-Ing. Döpp, Clausthal
Dr.-Ing. habil. Hopf, Freiberg

Tag der Verleihung: 30.03.2001

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenbau der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.

Herrn Professor Dr.-Ing. habil. J. Bast, Inhaber des Lehrstuhls für Hütten-, Gießerei- und Umformmaschinen, gilt mein besonderer Dank für die Möglichkeit der Durchführung sowie für seine stete Unterstützung und Förderung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Döpp vom Institut für Eisenhüttenkunde und Gießereiwesen der Technischen Universität Clausthal danke ich für die Übernahme des Koreferats dieser Arbeit.

Den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Hütten-, Gießerei- und Umformmaschinen und des Gießerei- Instituts danke ich für ihre freundliche Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit und für die nützlichen Hinweise, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Kurzreferat

Das Niederdruckgießen ist ein innovatives Gießverfahren. Es ermöglicht die gesteuerte Formfüllung entgegen der Schwerkraft. Die Entwicklung einer Niederdruck-Gießeinrichtung für Eisen-Kohlenstoff-Legierungen und die Anwendung der gesteuerten Formfüllung sind die Ziele der Arbeit. Ausgehend von den Niederdruck-Gießeinrichtungen für Aluminium werden Werkstoffe getestet, die sich als Material für das Steigrohr eignen. Für das Verfahren wird eine Niederdruck-Gießeinrichtung im Labormaßstab entwickelt. Diese umfaßt den Druckbehälter, das Steigrohr, die Heizung und die Druckluftsteuerung. Für eine industrielle Anlage werden die Konstruktionsunterlagen erarbeitet. Mit der Laboranlage wird der Nachweis erbracht, daß das Verfahren prinzipiell für Eisen-Kohlenstoff-Legierungen anwendbar ist. Die Problematik der gesteuerten Formfüllung wird an einem Beispiel gezeigt. Mit einer Tabellenkalkulation wird eine einfache Berechnungsgrundlage für die gesteuerte Formfüllung vorgestellt. Diese wird mit einem Simulationsprogramm und durch Versuche bestätigt.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 0. | Einleitung | 1 |
| 1. | Problemstellung | 2 |
| 1.1. | Konstruktive Aufgaben | 2 |
| 1.2. | Gesteuerte Formfüllung | 3 |
| 2. | Stand der Technik | 5 |
| 2.1. | Gußstückherstellung | 5 |
| 2.1.1. | Gießwerkstoffe | 5 |
| 2.1.1.1. | Eisenwerkstoffe | 5 |
| 2.1.1.2. | Nichteisenwerkstoffe | 6 |
| 2.1.1.3. | Eigenschaften der Gießwerkstoffe | 8 |
| 2.1.2. | Formwerkstoffe | 9 |
| 2.1.3. | Gießverfahren | 11 |
| 2.1.3.1. | Schwerkraftguß | 11 |
| 2.1.3.2. | Niederdruckguß | 13 |
| 2.1.4. | Gesteuerte Formfüllung | 15 |
| 2.2. | Steigrohrwerkstoffe | 20 |
| 3. | Verfahrenstechnische Grundlagen für die Dimensionierung | 21 |
| 3.1. | Niederdruck-Gießverfahren | 21 |
| 3.2. | Strömungstechnik | 23 |
| 3.3. | Thermodynamische Grundlagen | 26 |
| 4. | Niederdruck-Laborgießanlage | 30 |
| 4.1. | Niederdruck-Gießofen | 30 |
| 4.2. | Erwarteter Temperaturverlauf im Laborgießofen | 31 |
| 4.3. | Temperaturreglung | 33 |
| 4.4. | Druckluftsteuerung | 35 |
| 4.4.1. | Pneumatikschaltplan | 35 |
| 4.4.2. | Steuerungsschaltplan (PC) | 36 |
| 4.5. | Stand der Entwicklung (Sicherheitshinweise) | 40 |
| 5. | Konstruktion einer Niederdruck-Gießeinrichtung für Eisen-Kohlenstoff-Legierungen für den betrieblichen Einsatz | 43 |
| 5.1. | Vorgaben | 43 |
| 5.2. | Konzeption der Niederdruck-Gießeinrichtung | 43 |
| 5.3. | Verschluß des Ofens | 45 |
| 5.3.1. | Flansch | 45 |
| 5.3.2. | Deckel | 46 |
| 5.3.3. | Kokillenhalterung | 50 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 5.4. | Steigrohr | 51 |
| 5.4.1. | Steigrohrmaterial | 51 |
| 5.4.1.1. | Versuchsdurchführung | 51 |
| 5.4.1.2. | Keramikrohre | 52 |
| 5.4.1.3. | Keramikfaserrohre | 53 |
| 5.4.1.4. | Graphitrohre | 54 |
| 5.4.1.5. | Quarzglasrohre | 54 |
| 5.4.1.6. | Bewertung der Rohre | 55 |
| 5.4.2. | Ausführung | 56 |
| 5.5. | Konstruktive Zusammenfassung | 57 |
| 6. | Experimente | 59 |
| 6.1. | Niederdruck-Gießverfahren | 59 |
| 6.1.1. | Erprobung der Laborgießanlage | 59 |
| 6.1.2. | Versuche mit Eisen-Kohlenstoff-Legierungen | 60 |
| 6.1.2.1. | Versuche mit Stahl | 60 |
| 6.1.2.2. | Versuche mit legiertem Gußeisen | 61 |
| 6.2. | Aufheizverhalten einer Graphitform | 63 |
| 6.3. | Erstarrungsverhalten bei vorgewärmten Formen | 65 |
| 6.4. | Zusammenfassende Bewertung der Experimente | 66 |
| 7. | Gesteuerte Formfüllung | 67 |
| 7.1. | Problematik | 67 |
| 7.2. | Lösungen zur Realisierung der gesteuerten Formfüllung | 69 |
| 7.2.1. | Lösung für die gesteuerte Formfüllung einfacher Geometrien | 69 |
| 7.2.2. | Kommerzielle Simulationssoftware | 71 |
| 7.3. | Beispiele | 73 |
| 7.3.1. | Einfache Geometrien | 73 |
| 7.3.1.1. | Versuchsaufbau | 73 |
| 7.3.1.2. | Berechnung mit dem Rechnerprogramm Microsoft Excel | 74 |
| 7.3.1.3. | Berechnung mit dem Rechnerprogramm Magmasoft | 78 |
| 7.3.1.4. | Laborversuch | 80 |
| 7.3.1.5. | Vergleich der Ergebnisse | 81 |
| 7.3.2. | Zugstäbe | 83 |
| 7.3.3. | Gußstück | 84 |
| 8. | Zusammenfassung | 86 |
| 9. | Ausblick - Die gesteuerte Formfüllung beim Hohlgießverfahren | 87 |
| 9.1. | Ziel des Hohlgießverfahrens | 87 |
| 9.2. | Darstellung des Verfahrens | 88 |
| 9.3. | Probleme bei der Herstellung von Hohlkörpern | 88 |
| 9.4. | Anwendungsgebiete | 89 |
| 9.4.1. | Individuelle Prothetik | 89 |
| 9.4.2. | Industrielle Anwendungen | 91 |
| 10. | Vorschläge für weiterführende Arbeiten | 93 |
| 11. | Literatur | 94 |

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole

| <i>Symbol</i> | <i>Einheit</i> | <i>Bezeichnung</i> |
|---|-------------------------------------|--|
| A | [m ²] | Fläche |
| A ₁ | [m ²] | Fläche der Schmelzebadoberfläche |
| A ₂ | [m ²] | Fläche des Steigrohrquerschnitts |
| A ₃ | [m ²] | Fläche des Gußstücks in Abhängigkeit von der Höhe |
| A _{Deckel} | [m ²] | Fläche des Deckels |
| A _P | [m ²] | Spannungsquerschnitt der Platte |
| A _S | [m ²] | Spannungsquerschnitt der Schraube |
| c | [J/g*K] | Spezifische Wärmekapazität |
| c ₁ ; c ₂ ; c ₃ ; c ₄ | [J/g*K] | Spezifische Wärmekapazität der Schichten |
| c _{1Z} ; c _{2Z} ; | [1] | Schwächungszugaben |
| C ₁₂ | [W/m ² *K ⁴] | Strahlungskonstante |
| C _{12_1} | [W/m ² *K ⁴] | Strahlungskonstante zwischen Schmelze und Isolierung |
| C _{12_2} | [W/m ² *K ⁴] | Strahlungskonstante zwischen Behälter und Umgebung |
| C _P | [N/m] | Federsteifigkeit der Platte |
| C _S | [N/m] | Federsteifigkeit der Schraube |
| C _{Schwarz} | [W/m ² *K ⁴] | Strahlungskonstante des schwarzen Körpers |
| d | [m] | Durchmesser |
| d _a | [m] | Außendurchmesser |
| d _i | [m] | Innendurchmesser |
| d _{Deckel} | [m] | Durchmesser des Deckels |
| E | [MPa] | Elastizitätsmodul |
| EPS | | Expandierbares Polystyrol |
| F | [N] | Kraft |
| F _B | [N] | Betriebskraft |
| F _{SZ} | [N] | Schraubenzusatzkraft |
| F _V | [N] | Vorspannkraft |
| g | [m/s ²] | Erdbeschleunigung |
| Gd | | Gasdurchlässigkeit |
| Gr | [1] | Grashof- Zahl |
| h | [m] | Höhe |
| Δh | [m] | Höhendifferenz |
| h _{gerade} | [m] | Druckhöhe |
| h _{Gieß} | [m] | Höhe der Schmelze im Gießsystem |
| h _{Steig} | [m] | Höhe der Schmelze in der Form |
| k | [W/m ² *K] | Wärmedurchgangskoeffizient |
| K | [MPa] | 0,2 %- Dehngrenze |
| l | [m] | Länge |
| M _G | [Nm] | Drehmoment im Gewinde |
| m | [kg] | Masse |
| n | [1] | Koeffizient für Querschnittsänderungen |
| Nu | [1] | Nußelt- Zahl |
| P | [W] | Leistung |
| P _G | [m] | Gewindesteigung |
| p | [MPa] | Druck |
| p ₁ | [MPa] | Gießdruck |

| <i>Symbol</i> | <i>Einheit</i> | <i>Bezeichnung</i> |
|--|-----------------------|---|
| p_2 | [MPa] | Gegendruck |
| p_{\max} | [MPa] | maximaler Druck |
| Δp_v | [MPa] | Druckverluste |
| Pr | [1] | Prandtl- Zahl |
| Q | [NL/min] | Normvolumenstrom |
| Re | [1] | Reynoldszahl |
| Re_k | [1] | kritischer Wert der Reynoldszahl (Übergang laminar - turbulent) |
| S | [1] | Sicherheit |
| S_D | [1] | Sicherheit gegen Dauerbruch |
| $S_{0,2}$ | [1] | Sicherheit gegen Streckgrenze |
| $s_1; s_2; s_3; s_4$ | [m] | Dicke der Schichten |
| s_v | [m] | vorhandene Wandstärke |
| s | [m] | Weg |
| T | [°C] | Temperatur |
| T_1 | [°C] | Schmelzetemperatur |
| T_2 | [°C] | Umgebungstemperatur |
| T_{w1} | [°C] | Temperatur der inneren Wand |
| T_{w2} | [°C] | Temperatur der äußeren Wand |
| $T_{z1}; T_{z2}; T_{z3}$ | [°C] | Temperatur der Zwischenschichten |
| t | [s] | Zeit |
| Δt | [s] | Zeitdifferenz |
| U | [V] | Spannung |
| v | [m/s] | Geschwindigkeit |
| v_1 | [m/s] | Geschwindigkeit der Schmelze im Tiegel |
| v_2 | [m/s] | Geschwindigkeit der Schmelze im Steigrohr |
| v_3 | [m/s] | Geschwindigkeit der Schmelze in der Form |
| V | [1] | Vorspannverhältnis |
| \dot{V} | [m ³ /s] | Volumenstrom |
| W | [J] | Wärmemenge |
| W_t | [Nm] | Widerstandsmoment (Torsion) |
| z | [m] | Koordinate |
| z_1 | [m] | Auslenkung der Schmelze im Tiegel |
| z_2 | [m] | Auslenkung der Schmelze im Steigrohr |
| Φ | [W] | Wärmestrom |
| α | [W/m ² *K] | Wärmeübergangskoeffizient |
| $\alpha_1; \alpha_2$ | [W/m ² *K] | Wärmeübergangskoeffizienten |
| α_K | [W/m ² *K] | Wärmeübergangskoeffizienten durch Konvektion |
| α_{1S} | [W/m ² *K] | Wärmeübergangskoeffizienten durch Strahlung an der inneren Wand |
| α_{2S} | [W/m ² *K] | Wärmeübergangskoeffizienten durch Strahlung an der äußeren Wand |
| $\epsilon_{11}; \epsilon_{12}; \epsilon_{21}; \epsilon_{22}$ | [1] | Emissionszahlen |
| η | [Pa*s] | Dynamische Viskosität |
| λ_R | [1] | Rohrreibungswert |
| λ | [W/m*K] | Wärmeleitfähigkeit |
| $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ | [W/m*K] | Wärmeleitfähigkeiten der Schichten |

| <i>Symbol</i> | <i>Einheit</i> | <i>Bezeichnung</i> |
|----------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| ν | [m ² /s] | Kinematische Viskosität |
| ρ | [kg/m ³] | Dichte |
| $\rho_1; \rho_2; \rho_3; \rho_4$ | [kg/m ³] | Dichte der Schichten |
| ρ_s | [kg/m ³] | Dichte der Schmelze |
| $\sigma_{0,2}$ | [MPa] | Streckgrenze |
| σ_a | [MPa] | Ausschlagsspannung |
| σ_v | [MPa] | Vergleichsspannung |
| σ_z | [MPa] | Zugspannung |
| σ_{zul} | [MPa] | zulässige Spannung |
| τ_t | [MPa] | Torsionsspannung |
| ζ | [1] | Reibungs- und Widerstandswert |

Konstanten:

$C_{\text{Schwarz}} = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ (Strahlungskonstante des schwarzen Körpers)

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ (Erdbeschleunigung)

0. Einleitung

Das Gießen von Metallen hat eine jahrtausend alte Tradition. Dabei gibt es eine stete Weiterentwicklung der Verfahren, nach denen Metalle gegossen werden. Das gleiche gilt für die Werkstoffe, die gegossen bzw. zum Gießen benötigt werden. In letzter Zeit ist unter anderem das Niederdruck-Gießverfahren zu einem wichtigen und zukunftssträchtigen Verfahren weiterentwickelt worden. Es bietet einige Vorteile gegenüber dem herkömmlichen Schwerkraftguß. Bei diesem Verfahren wird die zum Gießen benötigte Schmelze unterhalb der Schmelzebadoberfläche aus einem Tiegel oder Ofen abgezogen. Schlacke und Oxidationsprodukte können nicht in die Form gelangen. Durch Beheizung des Tiegels ist es möglich, mit einer konstanten Temperatur zu gießen. Das bietet den Vorteil, daß die Gußstücke nahe der Liquidus-Temperatur vergossen werden. Dies kommt einer gerichteten Erstarrung der Gußstücke entgegen. Desweiteren kann das zu vergießende Metall mit einer definierten Geschwindigkeit in die Form gefüllt werden, wodurch Einschlüsse durch turbulente Strömung der Schmelze verhindert werden. Die Formfüllzeit ist definiert steuerbar. Durch geeignete Maßnahmen kann der Einguß als Speiser genutzt werden. Aus den genannten Vorteilen des Niederdruck-Gießverfahrens ergeben sich neue Möglichkeiten für eine gesteuerte Formfüllung. Durch die Realisierung einer solchen gesteuerten Formfüllung kann erheblicher Nutzen in der Qualitätssicherung der Gußteilmfertigung erzielt werden. Insbesondere werden die Ergebnisse reproduzierbar, wodurch sich die Behebung von Gußfehlern wesentlich einfacher gestaltet.

Das Niederdruck-Gießverfahren wird heute bereits für mehrere Metalle angewandt, insbesondere jedoch beim Aluminium. Dort wird es unter anderem im Automobilbau zur Herstellung von Zylinderkurbelgehäusen im Lost-Foam-Verfahren eingesetzt. Die Entwicklung auf diesem Gebiet ist bereits weit fortgeschritten. Im Gegensatz dazu beschränkt sich die Entwicklung im Bereich der Eisen-Kohlenstoff-Legierungen auf einzelne Anwendungen. Dies liegt in den wesentlich höheren Gießtemperaturen und den daraus resultierenden Anforderungen an die Materialien für das Steigrohr und die Ofenkonstruktion begründet.

In der Arbeit wird eine konstruktive Lösung für das Niederdruckgießen von Eisenlegierungen in Form einer Versuchseinrichtung vorgestellt. Weiterhin wird anhand theoretischer Modelle die Berechnung der gesteuerten Formfüllung von Eisenlegierungen dargelegt. Wie die Ergebnisse in die Praxis umgesetzt werden können, wird anhand der ermittelten Ergebnisse im Modellversuch dargestellt.

1. Problemstellung

1.1. Konstruktive Aufgaben

Das beim Aluminiumguß bereits erfolgreich eingeführte Niederdruck-Gießverfahren bietet besondere Vorteile gegenüber dem Schwerkraftguß. Es ist deshalb auch interessant, diese Vorteile für andere Gußwerkstoffe zu nutzen. Eine solche Werkstoffgruppe sind beispielsweise die Eisen-Kohlenstoff-Legierungen. Dabei unterscheiden sie sich vom Aluminium unter anderem durch die hohen Schmelztemperaturen, die über 1500 °C betragen können. Das führt zu wesentlich höheren Anforderungen an die einzusetzenden Materialien der Gießeinrichtung und ihre konstruktive Ausführung. Insbesondere bei den Materialien für das Steigrohr wird die Problematik deutlich. Die hier einzusetzenden Materialien müssen nicht nur die reine thermische Belastung aushalten, sondern müssen auch die entsprechende Temperaturwechsel an der Schmelzbadoberfläche und während des Gießens ertragen. Beim Niederdruckgießen von Aluminium werden beispielsweise Steigrohre aus Gußeisen eingesetzt.

Niederdruck-Gießanlagen für Aluminium-, Magnesium- und Kupferlegierungen sind heute im Handel erhältlich [1][2][3][4]. Gießanlagen für Gußeisen oder Stahl sind gegenwärtig nicht käuflich zu erwerben. Aus diesem Grund ist eine solche Gießeinrichtung zu entwickeln, um Untersuchungen zur gesteuerten Formfüllung durchführen zu können.

Als apparative Voraussetzung für eine Laboranlage ist ein druckdichter Warmhalteofen mit Widerstandsheizung zu entwickeln. Die notwendige Druckluftsteuerung ist analog der Steuerung, die bei Niederdruckgießöfen für Aluminium verwendet werden, aufzubauen. Es sind alle notwendigen Ausrüstungen zu entwickeln.

Für das Steigrohr ist ein geeignetes Material zu finden, welches die Temperatur von 1600 °C aushält und die entsprechende Temperaturwechselfestigkeit besitzt.

Desweiteren sind für eine industrielle Anwendung alle Teile oberhalb eines druckdichten Induktionsofens zu realisieren. Das beinhaltet den druckdichten Verschluß des Ofens (Deckel), das Steigrohr und die notwendigen Isoliermaterialien.

Die Anlage ist so auszulegen, daß sie einen Druck von 1 bar und die Wärmestrahlung einer Stahlschmelze bei 1600 °C erträgt.

1.2. Gesteuerte Formfüllung

Der Begriff Formfüllung bezeichnet den Vorgang des Einfließens der flüssigen Schmelze in den Formhohlraum. In dieser Phase des Gießprozesses können Gußfehler durch den Einschluß von Fremdkörpern und Gasen in das Gußstück entstehen. Beim Schwerkraftguß kann die Schmelze je nach Anschnitt von oben, von der Seite oder von Unten in den Formhohlraum gelangen. Die Gießweise von oben hat den Vorteil, daß das Angußsystem kurz ist und dadurch ein gutes Ausbringen möglich ist. Der Nachteil ist jedoch, daß die Schmelze entsprechend der Erdbeschleunigung mit $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ beschleunigt wird und eine Einflußnahme auf die daraus resultierende Geschwindigkeit im Formhohlraum nicht möglich ist. Gußfehler, wie Einschlüsse von Gasblasen und ausgewaschenen Formbestandteilen, können die Folge sein. Auch der Weg der flüssigen Schmelze ist nicht beeinflussbar. Kaltlauf oder -schweißung sind weitere mögliche Gußfehler. Das Gießen von Unten hat gegenüber dem Gießen von oben den Nachteil eines schlechteren Ausbringens. Beim Abguß der Form steigt die Schmelze im Formhohlraum jedoch nur soweit wie sie im Einguß steht. Dadurch kann die Geschwindigkeit der Schmelze im Formhohlraum beeinflusst werden. Gußfehler, wie bei der Gießweise von oben beschrieben, werden vermieden. Die Einflußnahme auf die Geschwindigkeit im Formhohlraum setzt die Messung der Durchflußmenge der Schmelze aus der Transportpfanne oder die Onlinemessung der Steighöhe der Schmelze im Formhohlraum voraus.

Durch Anwendung des Niederdruck-Gießverfahrens ist es nun möglich, die Vorteile der jeweiligen Gießweisen nicht nur zu nutzen, sondern noch zu verstärken. Insbesondere kann die Geschwindigkeit im Formhohlraum direkt über den angelegten Gasdruck geregelt werden. Diese Geschwindigkeit hat wiederum Einfluß auf andere Gießprozeßparameter. So sind die Formfüllzeit und der Temperaturverlust der Schmelze während des Gießens unter anderem von der Geschwindigkeit abhängig.

Unter gesteuerter Formfüllung ist zu verstehen, daß die Geschwindigkeit der Schmelze an jedem Ort der Form zu jeder Zeit bekannt ist und entsprechend den Erfordernissen, die die Herstellung eines guten Gußstückes voraussetzen, geändert werden kann. Die Untersuchungen zur gesteuerter Formfüllung beinhalten sowohl die Modellierung der Strömungsvorgänge als auch Versuche an der Niederdruck-Gießanlage.

Die Strömungsvorgänge sind zu modellieren und eine Vorschrift zur Druckluftsteuerung ist zu erstellen.

Die Vorgänge der Erstarrung sind einerseits daraufhin zu untersuchen, ob ein Einfluß auf die gesteuerte Formfüllung existiert und andererseits, ob das Steigrohr als Speiser genutzt werden kann. Das Ziel ist, auf weitere Speiser zu verzichten. Das bedeutet, daß die Wärmeabfuhr durch eine spezielle Gestaltung der Kokillen in Bezug auf ihre Materialzusammensetzung definiert erfolgen muß.

2. Stand der Technik

2.1. Gußstückherstellung

2.1.1. Gießwerkstoffe

2.1.1.1. Eisenwerkstoffe

Eisenwerkstoffe werden untergliedert in Stahl und Gußeisen. Sie unterscheiden sich im Kohlenstoffgehalt und in den Eigenschaften. Als Stahl werden Eisenwerkstoffe mit einem Kohlenstoffgehalt von weniger als 2 % bezeichnet. Der Kohlenstoff liegt bei den Stählen in chemisch gebundener Form vor. Beim Gußeisen wird er teilweise als Graphit ausgeschieden.

Stahlguß

Stahlguß wird in Sandformen oder Dauerformen aus Graphit oder Metall vergossen. Die Festigkeitseigenschaften sind weitgehend richtungsunabhängig. Durch Zusatz von Legierungselementen können die Eigenschaften beeinflusst werden. Wärmebehandlungen, wie Normalglühen und Vergüten, können die Eigenschaften nach dem Gießen beeinflussen. Das Gefüge entspricht dann denen der Schmiedestähle. Stahl ist verglichen mit Gußeisen infolge seiner höheren Schmelztemperatur schlechter vergießbar. Seine Lunkerneigung ist durch die größere Schwindung (ca. 2 %) höher. Aufgrund seiner einfachen Formgebung hat Stahlguß bei bestimmten Gußstücken Kostenvorteile. Außerdem wird Stahlguß dort eingesetzt, wo die Weiterverarbeitung auf Schwierigkeiten stößt, wie zum Beispiel bei Dauermagnetguß und Manganhartstahlguß [5]. Die Gießtemperaturen betragen 1500 °C bis 1600 °C.

Gußeisen

Gußeisen ist eine Eisen-Kohlenstoff-Legierung mit einem Kohlenstoffgehalt von über 2 %. Der maximale Gehalt an Kohlenstoff liegt jedoch selten über 4,5 %. Der Kohlenstoff liegt bei schneller Abkühlung in Verbindung mit Eisen als Eisenkarbid vor. Die Bruchflächen erscheinen in diesem Fall hell. Das Gußeisen wird dann als weißes Gußeisen bezeichnet. Es ist sehr hart und spröde und kann nur durch Schleifen bearbeitet werden.

Bei langsamer Abkühlung scheidet sich der Kohlenstoff elementar als Graphit aus. Die Bruchfläche hat ein dunkles Aussehen, deshalb wird es als graues Gußeisen bezeichnet. Die am häufigsten verwendete Art des Gußeisens ist das Gußeisen mit Lamellengraphit. Der Kohlenstoff liegt in Lamellenform vor. Die Festigkeit ist relativ niedrig, wobei die Druckfestigkeit viermal höher ist als die Zugfestigkeit. Eine Erhöhung der Festigkeit wird beim Gußeisen mit Kugelgraphit erreicht. Die Graphitausscheidungen liegen in Kugelform vor. Die innere Kerbwirkung wird dadurch gegenüber den Graphitlamellen vermindert. Die Gießtemperaturen liegen zwischen 1250 °C und 1500 °C.

2.1.1.2. Nichteisenwerkstoffe

Die im Zusammenhang mit dem Niederdruck-Gießverfahren am häufigsten verwendeten Nichteisenmetalle sind Aluminium-, Magnesium- und Kupferlegierungen.

Aluminium

Aluminium ist nach Stahl der meistangewandte Werkstoff [5]. Die Dichte beträgt 2700 kg/m^3 und entspricht damit einem Drittel der Dichte von Stahl. Die Zugfestigkeit bestimmter Aluminiumlegierungen erreichen ähnliche Werte wie die einiger Stahlsorten. Dies ermöglicht eine Leichtbauweise allein durch die Materialsubstitution, insbesondere bei bewegten Konstruktionen. Der Elastizitätsmodul ist mit 70 GPa relativ niedrig. Weitere Vorteile liegen in der guten Korrosionsbeständigkeit, in der sehr guten Wärmeleitfähigkeit sowie in der sehr guten elektrischen Leitfähigkeit. Aluminium läßt sich gut verformen, beispielsweise durch Walzen, Ziehen oder Strangpressen. Dies wird unter anderem bei der Herstellung von rohr- oder kastenförmigen Hohlprofilen angewandt.

Bei der Herstellung von Werkstücken aus Aluminium werden Legierungen verwendet. Wichtigstes Legierungselement ist Silizium. Es bildet bei 12 % mit Aluminium ein Eutektikum, das sich sehr gut vergießen läßt. Der Schmelzbereich liegt je nach Legierung zwischen 510 °C und 650 °C. Die Gießtemperaturen werden mit 680 °C bis 750 °C angegeben [6].

Magnesium

Magnesium ist mit einer Dichte von 1800 kg/m^3 um $1/3$ leichter als Aluminium. Die Festigkeitswerte sind niedriger als die von Aluminium. So beträgt beispielsweise die Zugfestigkeit von GD-MgAl4Si1 ca. 250 MPa. Der Elastizitätsmodul beträgt ca. 43 GPa. Der Schmelzbereich für Magnesiumlegierungen liegt zwischen $470 \text{ }^\circ\text{C}$ und $620 \text{ }^\circ\text{C}$. Für das Gießen sind auf Grund der hohen Oxidationsneigung besondere Maßnahmen, wie das Gießen unter Schutzgas, erforderlich. Legierungsbestandteil ist vor allem Aluminium zur Erhöhung der Festigkeit.

Kupfer

Kupfer hat eine sehr gute elektrische Leitfähigkeit und eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit. Es ist beständig gegen Warmwasser und manche Säuren. Aus diesem Grund ist es ein sehr wichtiger Gußwerkstoff. Mit einer Dichte von 8920 kg/m^3 gehört es zu den Schwermetallen. Es gibt verschiedene Kupferlegierungen.

Kupfer-Zink-Legierungen (Messing) mit Anteilen von bis zu 45 % Zink und 3 % Blei zeichnen sich durch eine gute Verformbarkeit und Korrosionsbeständigkeit aus.

Kupferlegierungen mit mehr als 60 % Kupferanteil, deren wichtigster Legierungsbestandteil nicht Zink ist, werden als Bronze bezeichnet. Aluminiumbronzen haben einen Anteil von bis zu 11 % Aluminium und besitzen eine hohe Warmfestigkeit, Zunder- und Korrosionsbeständigkeit. Zinnbronzen können als Gußwerkstoff bis zu 20 % Zinn enthalten. Sie zeichnen sich durch eine hohe Härte und Duktilität sowie eine gute Korrosionsbeständigkeit aus. Weiterhin gibt es Bleibronzen mit Bleigehalten von bis zu 35 %. Es werden noch andere Elemente wie Zinn, Zink und Nickel zulegiert. Blei ist in Kupfer nicht löslich und lagert sich in rundlicher Form im Kupfer ein. Daraus ergeben sich gute Schmier- und Notlaufeigenschaften. Außerdem gibt es Sonderbronzen wie die Nickel- oder Manganbronzen.

Die Gießtemperaturen liegen bei ca. $1200 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.1.1.3. Eigenschaften der Gießwerkstoffe

Tabelle 1 zeigt eine Auswahl der für das Niederdruck-Gießverfahren relevanten Gießwerkstoffe und einige ihrer Eigenschaften. Die Eigenschaften sind sowohl für den festen als auch für den schmelzflüssigen Zustand angegeben. Die Temperatur von 20 °C bezeichnet den festen Zustand. Jede andere Temperatur ist kennzeichnend für den flüssigen Zustand. Der Schmelzbereich bezeichnet für die reinen Elemente die Schmelztemperatur [8] und für die Legierungen den Bereich zwischen Solidus- und Liquiduslinie [6].

| Gießwerkstoff | Temp. [°C] | Dichte [kg/m ³] | dyn. Viskosität [mPa*s] | Schmelz- bereich [°C] | Wärmeleit- fähigkeit [W/m*K] | spez. Wärme- kapazität [kJ/kg*K] | Schmelz- wärme [kJ/kg] |
|------------------|---------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|------------------------------|
| Aluminium | 20 | 2702 | | 660 | 209 | 0,896 | 396 |
| | 700 | 2360 | 1,14 | | | | |
| | 750 | 2340 | 1,05 | | | | |
| G-AlSi12 | 20 | 2650 | | 570 - 600 | 130 - 190 | 0,900 | |
| | 700 | 2440 | 1,03 | | | | |
| | 750 | 2420 | 0,95 | | | | |
| Magnesium | 20 | 1740 | | 650 | 157 | 1,047 | 368 |
| | 700 | 1600 | | | | | |
| GD-MgAl 6 Zn 1 | 20 | 1800 | | 400 - 600 | | 1,050 | |
| | 700 | 1600 | | | | | |
| Kupfer | 20 | 8920 | | 1083 | 372 | 0,385 | 212 |
| | 1100 | 8200 | 3,90 | | | | |
| | 1145 | 7900 | 3,40 | | | | |
| Messing | 20 | 8300 | | 895 - 1025 | 95 | 0,389 | |
| Zinnbronze | 20 | 8800 | | 910 - 1040 | | 0,380 | |
| Alubronze | 20 | 7730 | | 1030 - 1080 | | 0,440 | |
| Gußeisen C 3,9 % | 20 | 7200 | | 1153 | 52,5 | 0,460 | |
| | 1180 | 6900 | 4,00 | | | | |
| | 1300 | 6500 | | | | | |
| GG - 30 | 20 | 7350 | | 1150 - 1330 | 47,5 | 0,460 | |
| Eisen | 20 | 7860 | | 1535 | 52,0 | 0,460 | 274 |
| | 1535 | 6900 | | | | | |

Tabelle 1: Eigenschaften der Gießwerkstoffe [5][6][7][8]

2.1.2. Formwerkstoffe

Es werden zwei Arten von Formen unterschieden, verlorene Formen und Dauerformen.

Verlorene Formen

Die Form wird vor dem Gießen aus einem körnigen, schüttfähigen Formstoff hergestellt und nach dem Gießen wieder zerstört. Formwerkstoffe für verlorene Formen bestehen meist aus einem mineralischen, feuerfesten Grundstoff, z.B. Quarzsand mit Binderzusätzen. Tongebundene Formstoffe werden mechanisch durch Pressen, Stampfen, Rütteln usw. verdichtet, um eine stabile Form zu erhalten. Bei chemisch gebundenen Formstoffen wird die Festigkeit der Form durch die chemische Reaktion des Binders erreicht, dabei gibt es sowohl warmhärtende als auch kalthärtende Binder.

Bei einigen Formverfahren kann auf Binder verzichtet werden. Beim Vakuumformverfahren wird die Stabilität der Form durch das Evakuieren der Form erreicht. Die Kontur des späteren Gußstücks wird durch eine über das Modell gelegte Folie erhalten. Beim Magnetformverfahren wird ein Eisenpulver als Formstoff genutzt. Ein vergasbares Polystyrolmodell wird in das Eisenpulver eingebettet und dieses durch Anlegen eines starken Magnetfeldes verfestigt. Eine Kombination beider Verfahren stellt das Vollform-Gießverfahren in binderlosen Quarzsand dar. Hier wird ein vergasbares Polystyrolmodell in binderlosen Quarzsand eingebettet und dieser durch Vibration verdichtet. Durch Anlegen eines Unterdrucks wird die Form während des Gießens stabilisiert.

Dauerformen

Dauerformen sind dadurch gekennzeichnet, daß sie mehrmals verwendet werden können. Vor allem bei den Nichteisenmetallen Aluminium, Magnesium und Kupfer werden auf Grund ihrer relativ niedrigen Schmelztemperaturen Dauerformen eingesetzt. Als Formwerkstoff wird hier Stahl oder Gußeisen verwendet. Dauerformen für die Herstellung von Gußeisen können je nach Sorte ebenfalls aus Gußeisen oder Stahl sein. Für höher schmelzendes Gußeisen oder Stahl werden auch Formen aus Graphit verwendet [9]. Einen möglichen Einfluß des Kohlenstoffs der Graphitform auf den Kohlenstoffgehalt der Gußstücke kann durch einen keramischen Schlichteüberzug verhindert werden.

Die Formstoffe besitzen unterschiedliche thermische Eigenschaften. Diese haben Einfluß auf den Erstarrungsverlauf der Gußwerkstoffe und somit auf deren mechanischen Eigenschaften. So spielt beispielsweise die Erstarrungsgeschwindigkeit eine Rolle bei der Entstehung von weißem Gußeisen. Die thermischen Eigenschaften der Formwerkstoffe, die hier von Bedeutung sind, sind die Wärmeleitfähigkeit, die Wärmekapazität und die Dichte.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Eigenschaften einiger Grundbestandteile von Formstoffen.

| Bezeichnung | Dichte [kg/m ³] | Wärmeleitfähigkeit [W/m*K] | spezifische Wärmekapazität [kJ/kg*K] |
|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|
| Quarz | 2650 | 1,09 | 0,796 |
| Quarzsand, trocken | 1650 | 0,33 | 0,810 |
| Gußeisen | 7200 | 58 | 0,460 |
| Stahl | 7850 | 52 | 0,460 |
| Graphit | 2250 | 140 | 0,795 |
| Luft | 1,293 | 0,028 | 1,009 |
| Wasser | 1000 | 0,597 | 4,180 |

Tabelle 2: Eigenschaften einiger Grundbestandteile der Formwerkstoffe bei 20 °C

[5][8][10][11][12]

2.1.3. Gießverfahren

2.1.3.1. Schwerkraftguß

Der Schwerkraftguß ist das herkömmliche Gießverfahren. Das Gießen erfolgt ohne zusätzliche äußere Einwirkungen, das heißt, es wirkt während der Formfüllung nur die Schwerkraft. Der Schwerkraftguß wird bei Sandformen ebenso angewandt wie bei Kokillen. Es gibt beim Schwerkraftguß zwei grundsätzliche Gießweisen, die sich in der Art der Formfüllung unterscheiden. Dies ist zum einen die fallende Formfüllung (Bild 1) und zum anderen die steigende Formfüllung (Bild 2) [13][14].

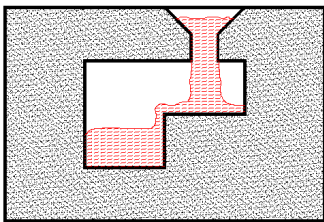


Bild 1: Fallende Formfüllung

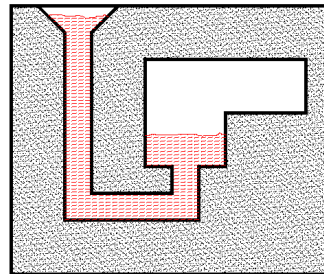


Bild 2: Steigende Formfüllung

Die fallende Formfüllung zeichnet sich dadurch aus, daß die Schmelze von oben in den Formhohlraum fließt. Die Formfüllung hängt dabei nur von der Schwerkraft ab. Die Geschwindigkeit der Schmelze und der Weg der Schmelze in der Form kann nicht beeinflusst werden. Ein Vorteil dieser Gießweise liegt darin, daß durch ein kurzes Anschnittsystem ein gutes Ausbringen möglich ist. Bei der steigenden Formfüllung wird das Anschnittsystem neben dem Formhohlraum nach unten geführt und der Formhohlraum von unten angeschnitten. Die einströmende Schmelze bildet eine Schmelzefront, die bei niedrigen Geschwindigkeiten an allen Stellen das gleiche Höhenniveau hat. Durch den Druckunterschied zwischen Formhohlraum und Einguß während des Gießvorganges gleicht sich die Höhe der Schmelze im Formhohlraum der Höhe der Schmelze im Einguß an (Bild 2). Die Formfüllgeschwindigkeit, das heißt die Geschwindigkeit der Schmelzefront im Formhohlraum, ist abhängig von der Druckhöhe im Einguß. Die Druckhöhe der Schmelze ist die Differenz zwischen der Höhe der Schmelze im Einguß und der Höhe der Schmelze im Formhohlraum. Diese Druckdifferenz kann durch die Querschnittsfläche des Anschnittsystems und den Volumenstrom der Schmelze aus der Gießpfanne beeinflusst

werden. Ein Vorteil dieser Gießweise liegt folglich darin, daß die Formfüllung in bestimmten Grenzen vorgegeben werden kann. Ein Nachteil gegenüber der Formfüllung von oben ist das schlechtere Ausbringen auf Grund des längeren Anschnittsystems. Es gibt daneben auch noch Varianten dieser Gießweisen, die sich von den genannten in der Höhe des Anschnitts an den Formhohlraum unterscheiden. Es erfolgt also partiell eine fallende Formfüllung und danach eine steigende.

Unabhängig von der Gießweise wird beim Schwerkraftguß entsprechend der Prozeßkette

Schmelzen - Umfüllen - Transportieren - Gießen

vorgegangen. Auftretende Qualitätsmängel können sowohl beim Umfüllen als auch beim Transportieren und Gießen verursacht werden. Die von der Formherstellung unabhängigen Nachteile des Schwerkraftgießens während dieser Prozeßschritte sind unter anderem:

- Der für das Vorwärmen der Gießpfanne notwendige Energiebedarf ist nicht exakt bestimmbar.
- Die Vorwärmtemperatur der Gießpfanne ist nicht genau definiert.
- Das Gießgut muß überhitzt werden, um die auf Erfahrungswerten beruhenden Temperaturverluste auszugleichen.
- Der Füllvorgang der Gießpfanne ist der Atmosphäre ausgesetzt und stark turbulent.
- Die Gießtemperatur ist fortlaufenden Schwankungen unterworfen.
- Die Gießgeschwindigkeit ist nicht regelbar.
- Der Eintritt nichtmetallischer Einschlüsse in die Form kann nicht vermieden werden.
- Der Gießstrahl reißt die umgebende Atmosphäre in die Form.
- Der Gießstrahl kann zur Beschädigung der Form, insbesondere des thermisch und mechanisch hochbeanspruchten Kanalsystems führen.
- Die Füllvorgänge im Kanalsystem und dem Formhohlraum sind örtlich und zeitlich unvorhersehbar variabel.
- Der Gesamtprozeß ist mathematisch nicht beschreibbar.
- Die Qualitätsparameter des Produktes sind nicht exakt prognostizierbar.
- Der Gesamtprozeß ist nicht reproduzierbar.

Der wesentliche Vorteil des Schwerkraftgießens ist, daß der Aufwand für die Gießausrüstung gegenüber den anderen Gießverfahren gering ist.

2.1.3.2. Niederdruckguß

Das Niederdruck-Gießverfahren bezeichnet das Gießen in Dauer- und Sandformen durch pneumatische Druckaufgabe auf eine Schmelze in einem Gießofen, bei dem die Schmelze entgegen der Schwerkraft durch ein Steigrohr in den Formhohlraum gefördert wird. Die Form wird dabei auf das Steigrohr aufgesetzt, welches durch den Deckel des Gießofens geführt wird und in die Schmelze eintaucht. Der Gießofen ist insgesamt druckdicht abgeschlossen (Bild 3) [15][16].

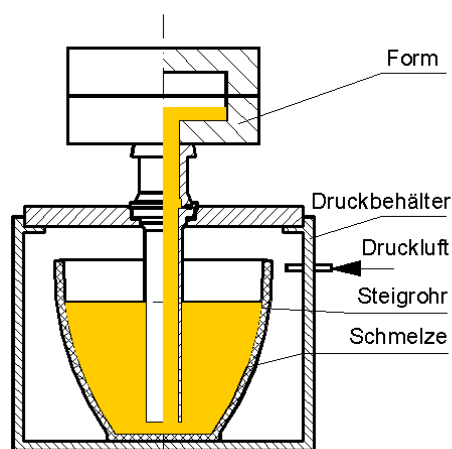


Bild 3 : Prinzip des Niederdruckofens

Durch Öffnen eines Ventils wird der Luftdruck im Inneren des Gießofens erhöht. Dadurch wird eine Kraft auf die Schmelzeoberfläche ausgeübt und die Schmelze im Steigrohr nach oben in die Form gefördert. Anstelle von Druckluft kann auch ein inertes Gas verwendet werden. Nach erfolgter Formfüllung wird der Druck im Gießofen noch so lange aufrecht erhalten, bis die Schmelze in der Form erstarrt ist. Die im Steigrohr befindliche Schmelze soll zu diesem Zeitpunkt noch flüssig sein, so daß sie nach dem Druckausgleich im Gießofen in den Tiegel zurückfließt. Der beim Niederdruckgießen angewandte Druck ist relativ niedrig und bewegt sich je nach notwendiger Steighöhe und der Dichte des Gußwerkstoffes zwischen 0,02 und 0,1 MPa [7][17][18]. Ein Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, daß auf Speiser fast vollständig verzichtet werden kann, da die Speisung durch das Steigrohr erfolgt. Um diesen Vorteil nutzen zu können, muß erreicht werden, daß die Erstarrung von oben her bis zu einer definierten Stelle direkt über dem Steigrohr erfolgt und im Steigrohr flüssig bleibt. Das kann erreicht werden, indem das Steigrohr beheizt wird oder eine spezielle

Wärmeisolierung erhält. Außerdem kann die Form, wenn es sich um eine Kokille aus Metall oder Graphit handelt, an speziellen Stellen gekühlt werden. Neuere Entwicklungen, insbesondere bei der Verwendung von Sandformen, gehen dahin, die Vorteile der steigenden Formfüllung zu nutzen, aber auf die Speisung durch das Steigrohr zu verzichten. Der Anschnitt der Form wird dabei verschlossen, bevor das Gußstück vollständig erstarrt ist. Der Druck im Niederdruckofen kann gesenkt werden, so daß die Schmelze aus dem Steigrohr in den Ofen zurückläuft, jedoch in der Form verbleibt, und der Gießzyklus wird beendet [19][20][21][22][23]. Damit wird sicherlich in den meisten Fällen eine Zeiteinsparung erreicht, die wirtschaftlicher als die Einsparungen durch ein gutes Ausbringen ist.

Niederdruck-Gießanlagen werden hauptsächlich für den Leichtmetallguß, vor allem Aluminiumlegierungen, mit einem Stückgewicht von ca. 1 bis 70 kg hergestellt [24][25][26][27][28][29][30]. Aber auch im Bereich des Schwermetallgusses, zum Beispiel dem Messingkokillenguß, findet das Verfahren Anwendung [7]. Im Bereich des Stahlgusses ist eine Anwendung aus den USA bekannt. Dort wurden bei der Griffin Wheel Company bereits in den 50iger Jahren Eisenbahnräder aus Stahl mit diesem Verfahren gegossen [9][31]. Weitere Anwendungen sind die Herstellung von bis zu 10 t schweren Edelstahlgußstücken und die Herstellung von bis zu 50 t schweren Brammen und Knüppel aus nichtrostenden Stählen für das Walzen [32].

Die Vorteile des Niederdruck-Gießverfahrens sind:

- Die beim Schwerkraftgießen auftretenden Temperaturschwankungen während der Prozeßschritte Umfüllen und Transportieren fallen beim Niederdruck-Gießverfahren weg.
- Das Überhitzen der Schmelze ist nicht erforderlich.
- Die Temperatur der Schmelze kann genau eingestellt werden.
- Der Eintritt nichtmetallischer Einschlüsse kann durch geeignete Maßnahmen verhindert werden.
- Der Gießvorgang ist mathematisch modellierbar, das heißt, die Gießgeschwindigkeit ist exakt regelbar.
- Gießfehler, wie Gaseinschlüsse durch turbulente Formfüllung oder Kaltlauf durch zu langsame Formfüllung, können mit der gesteuerten Formfüllung verhindert werden.
- Der Gesamtprozeß wird reproduzierbar.

Ein weiterer Vorteil besteht in der Möglichkeit, den gesamten Prozeß zu mechanisieren bzw. zu automatisieren. Das trifft sowohl auf die Steuerung des Gießprozesses selbst als auch auf

das Handling der Formen, des Gießmaterials, der Gußstücke und der Gießereihilfsstoffe zu [7][33][34][35].

Weitere Gießverfahren, die auf einem ähnlichen Wirkungsprinzip beruhen, sind das Gegendruckgießen, das Preßgießen (Squeeze-Casting) und das Druckgießen.

Beim Gegendruck-Gießverfahren wird im Unterschied zum Niederdruck-Gießverfahren bei sonst gleichem apparativen Aufbau zusätzlich eine Druckerhöhung in der Form vorgenommen. Die Gießdrücke liegen mit ca. 0,4 MPa über denen des normalen Niederdruck-Gießverfahrens, während die Druckdifferenz zwischen dem Druck in der Form und dem in der Gießeinrichtung nur ca. 0,05 MPa beträgt.

Das Druckgießverfahren zeichnet sich durch sehr hohe Drücke und sehr hohe Gießgeschwindigkeiten aus. Die Schmelze wird in eine Gießkammer gefüllt. An die Gießkammer ist die Form angeschlossen. Mit einem Druckkolben wird die Schmelze aus der Gießkammer mit sehr hoher Geschwindigkeit in die Form gedrückt. Die Schmelze erstarrt unter hohem Druck. Es werden damit sehr dünnwandige Teile gegossen und gute Oberflächen erreicht.

Das Preß-Gießverfahren ist eine Sonderform des Druck-Gießverfahrens. Der prinzipielle Unterschied besteht darin, daß beim Preß-Gießverfahren die Formfüllung langsam und steuerbar wie beim Niederdruck-Gießverfahren erfolgt. Die Erstarrung findet dann wieder unter hohem Druck statt.

Diese Verfahren sind für das Kokillengießen geeignet. Es werden sehr gute Gußteileigenschaften erzielt. Sandformen oder -kerne können bei diesen Verfahren jedoch nicht angewandt werden [7].

2.1.4. Gesteuerte Formfüllung

Die gesteuerte Formfüllung bezeichnet die Füllung der Form mit einer definierten Geschwindigkeit der Schmelzefront. Die Geschwindigkeit der Schmelzefront kann dabei zu jedem Zeitpunkt durch äußere Vorgaben verändert werden. Eine gesteuerte Formfüllung ist mit dem herkömmlichen Schwerkraftguß nicht erreichbar, da das Einfließen der Schmelze in den Formhohlraum ausschließlich von der Schwerkraft und den Metalleigenschaften abhängt. Durch das Niederdruck-Gießverfahren ist es nun möglich, die Formfüllgeschwindigkeit direkt über den angelegten Druck zu steuern. Damit ist eine wesentliche Voraussetzung für die

gesteuerte Formfüllung gegeben. Von der Formfüllgeschwindigkeit sind weitere Parameter abhängig.

Diese Parameter sind

- die Gießzeit,
- die Gießtemperatur,
- die Viskosität,
- die metallurgische Reinheit und
- die Gußstückqualität.

Durch die genaue Kenntnis dieser Parameter ist es möglich, prognostizierbare Werkstoff- und Bauteileigenschaften zu erzielen. Eine gesteuerte Formfüllung ist auf den heute bereits vorhandenen Niederdruck-Gießanlagen technisch möglich.

Am Beispiel des Vollformgießverfahrens sollen die Vorteile und die Notwendigkeit der gesteuerten Formfüllung dargestellt werden.

Vollformgießverfahren

Seit etwa vierzig Jahren werden Gußstücke mit dem Vollformgießverfahren hergestellt [36]. Im Gegensatz zu anderen Gießverfahren, bei denen die gießfertige Form das zukünftige Gußteil als Hohlraum abbildet, sieht das Vollformgießen die Verwendung geschichteter Positiv-Schaumstoffmodelle vor, die in ungebundenen Sand eingeformt werden. Die Form ist also, wie es durch den Namen des Verfahrens ausgedrückt wird, voll mit dem Modell aus expandierbaren Polystyrol ausgefüllt. Erst beim Gießen wird das vergasbare Modell fortschreitend durch die Schmelze zersetzt, diese nimmt den freiwerdenden Hohlraum ein und dort erstarrt. Dabei werden die Konturen des Schaumstoffmodells nachgebildet (Bild 4).

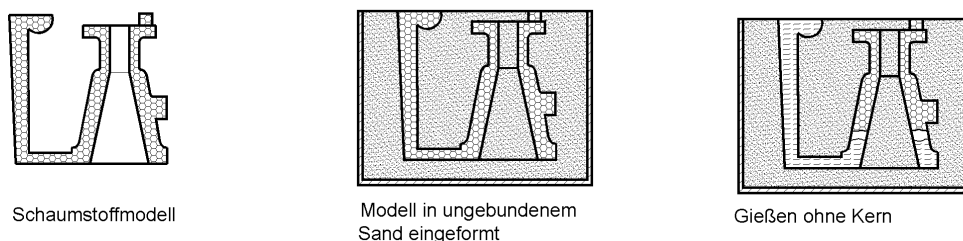


Bild 4: Prinzip des Vollformgießens

Die Modelle werden in Schäummaschinen aus vorgeschäumten, expandierbaren Polymerperlen hergestellt. Durch Montage einzelner Modellsegmente ist es möglich, komplexe Bauteile herzustellen. Die fertigen Modelle zeichnen sich durch eine hohe Maßhaltigkeit und komplexe Geometrie aus, die in anderen Formherstellungsverfahren eine kernreiche Form erfordert oder so nicht herstellbar wäre. Diese Tatsache eröffnet den Konstrukteuren eine völlig neue Dimension der Gestaltungsfreiheit. Obwohl die Kosten für das Modell recht hoch sein können, lassen sich die Aufwendungen für das fertige Endprodukt im Vergleich mit anderen Verfahren wesentlich senken [37]. Gegenwärtig werden eine Vielzahl verschiedener Großserienugußteile für den Automobilbau, die Elektrotechnik und andere Bereiche produziert [38].

Die Formfüllung beim Vollformgießen geht einher mit der kontinuierlichen Zersetzung des Schaumstoffmodells, bei der sich zwischen der Schmelzefront und dem Schaumstoffmodell ein Spalt bilden kann, in dem sich die durch die Wärme der fortschreitenden Schmelzefront verursachten Zersetzungsprodukte des Schaumstoffes befinden (Bild 5).

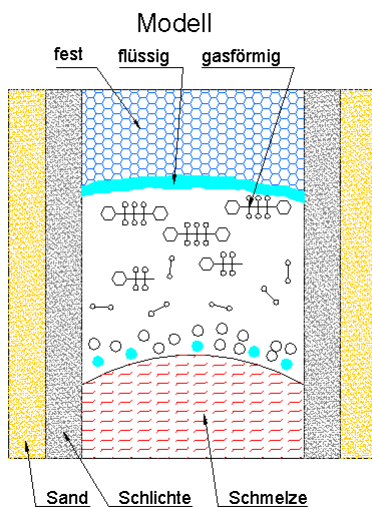


Bild 5: Zersetzungsspalt

Im Bereich dieses sich räumlich und zeitlich verändernden Zersetzungsspaltes sind Instabilitäten der Form möglich. Der Spalt zwischen Schaumstoff und Schmelzefront kann in Abhängigkeit von den Gießparametern bis zu mehreren Zentimetern groß sein. Die für die Spaltausbildung maßgeblichen Parameter sind die Gießgeschwindigkeit, die Gießtemperatur,

die Art und Dichte des Schaumstoffes, die Gasdurchlässigkeit der Schlichte und des Sandes sowie an den Klebestellen die Art und Menge des Klebers.

Durch die Zersetzung des Schaumstoffes entstehen flüssige und gasförmige Zersetzungsprodukte, die bei turbulenter Strömung der Schmelze von dieser erfaßt und eingeschlossen werden können und dann zu Gußfehlern führen. Die Entstehung gasförmiger Zersetzungsprodukte führt außerdem zu einem Überdruck im Spalt. Dieser Überdruck resultiert aus der entstehenden und der durch die Sand- und Schlichteschicht abgeführten Gasmenge. Er bremst die Schmelzebewegung ab. Die Größe des Zersetzungsspalts und der Überdruck in ihm beeinflussen beim Vollformgießen maßgeblich die Formfüllung [39][40][41][42][43].

Durch die Steuerung der Formfüllgeschwindigkeit läßt sich die Gußstückqualität in entscheidender Weise verbessern. In gewissen Grenzen kann auf mögliche Änderungen anderer Parameter reagiert werden, ohne Abstriche in der Gußstückqualität hinnehmen zu müssen. Sowohl eine zu niedrige als auch eine zu hohe Formfüllgeschwindigkeit kann zu fehlerhaften Gußstücken führen (Bild 6).

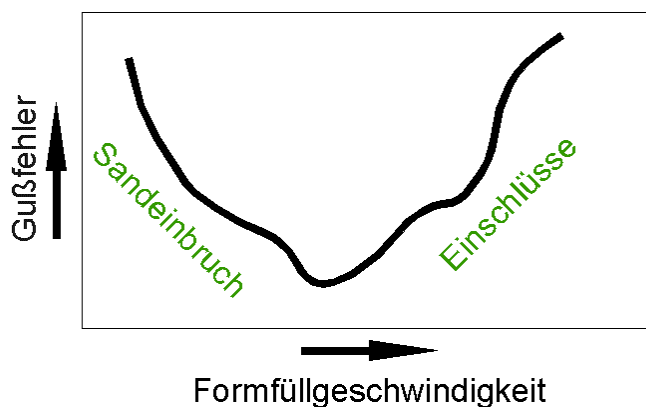


Bild 6: Gußfehler in Abhängigkeit von der Formfüllgeschwindigkeit

Die Formfüllgeschwindigkeit v resultiert aus der Druckhöhe p_1 und des durch die Zersetzung des Modells entstehenden Gegendruckes p_2 und berechnet sich in erster Näherung nach Bernoulli:

$$v = n \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_2)} \quad \text{G.1}$$

Hierin bedeutet n den Faktor für Querschnittsänderungen und ρ die Dichte des Gießmetalls.

Während die metallostatistische Druckhöhe beim steigenden Schwerkraftgießen eine Funktion der Steighöhe $p_1 = f(\Delta h) = \rho \cdot g \cdot (h_{\text{Gieß}} - h_{\text{Steig}})$ ist, wird sie beim Niederdruckgießen über die Druckbeaufschlagung der Schmelze im Tiegel als Funktion der Zeit $p_1 = f(t)$ realisiert. Durch die Anwendung entsprechender Drucksteuerungen ist jede beliebige Druckänderung und somit eine direkte Einflußnahme auf die Formfüllgeschwindigkeit möglich. Sie ist jetzt noch abhängig von den Querschnittsänderungen und dem Gegendruck. Die Querschnittsänderungen sind durch die Geometrie des Gußstücks vorgegeben. Sie können nur durch die Lage des Modells im Formsand beeinflusst werden.

Der Gegendruck entsteht durch die Umwandlung des festen Schaumstoffes in gasförmige Zersetzungsprodukte und ist eine Funktion der Temperatur, der Formfüllgeschwindigkeit und der Gasdurchlässigkeit: $p_2 = f(T, v, G_d)$. Durch das Anlegen eines Unterdruckes im Formsand kann die abgeführte Gasmenge erhöht und somit der Gegendruck verringert werden. Es besteht jedoch die Gefahr einer erhöhten Penetration durch das Anlegen eines Unterdruckes. Da der Gegendruck abhängig von der Formfüllgeschwindigkeit ist und diese wiederum vom angelegten Druck p_1 , kann bei Kenntnis der Abhängigkeiten zwischen Gießtemperatur, Formfüllgeschwindigkeit, Gasdurchlässigkeit und der daraus resultierenden Gasmenge und des Gasdrucks die Form nach definierten Vorgaben mit $p_1 = f(t)$ gefüllt werden [44][45].

Der wesentliche Unterschied der Formfüllung zwischen dem Schwerkraftguß und dem Niederdruckguß besteht folglich darin, daß die Formfüllgeschwindigkeit $v = f(p_1)$ beim Schwerkraftguß mit $p_1 = f(\Delta h)$, $h_{\text{Gieß}} = \text{konst.}$ nicht gesteuert werden kann, während sie beim Niederdruckguß mit $p_1 = f(t)$ steuerbar ist. Durch die Modellierung der Strömungsvorgänge beim Niederdruckgießen ist es dann möglich, ein Druckregime für die Druckluftsteuerung zu erstellen.

2.2. Steigrohrwerkstoffe

Das Steigrohr ist ein wesentlicher Bestandteil der Niederdruckanlage und dient der Aufwärtsförderung des zu vergießenden Metalls. Das Rohr ist dabei extremen Bedingungen über einen langen Zeitraum ausgesetzt. Es muß folgende Grundforderungen erfüllen [32]:

- Druckdichtheit,
- Beständigkeit gegen die Metallschmelzen,
- ausreichende mechanische Festigkeit,
- möglichst lange Haltbarkeit und
- günstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis.

Erkenntnisse über bekannte Werkstoffe für Steigrohre beziehen sich hauptsächlich auf das Gießen von Aluminium. Dort werden bevorzugt Steigrohre aus Gußeisen mit Lamellengraphit eingesetzt. Durch Schlichteüberzüge, gegebenenfalls in Verbindung mit Glasfasergewebe- oder Keramikpapierumhüllungen, werden die Rohre gegen die Aluminiumschmelze geschützt. Mit Hilfe dieser Maßnahmen können die Rohre bis zu 6 Wochen in der Schmelze bleiben, üblicherweise jedoch nur 1 - 3 Wochen. Weiterhin sind keramische Steigrohre bekannt [46], die beispielsweise aus Siliziumnitrid oder Aluminium-Titanat bestehen. Auch sind Steigrohre aus Ton-Graphit-Masse bekannt [51].

Für den Einsatz des Niederdruck-Gießverfahrens im Bereich des Eisengusses sind diese Werkstoffe jedoch nicht geeignet. Es müssen neue Werkstoffe gefunden werden, die den Bedingungen beim Eisenguß genügen. Sie müssen die hohen Temperaturen von bis zu 1650°C ertragen und auch eine hohe Temperaturwechselfestigkeit besitzen. Zusätzlich muß verhindert werden, daß insbesondere im Bereich niedriggekoelter Stähle eine Aufkohlung der Schmelze durch das Steigrohr erfolgt. Eine Aufkohlung der Schmelze würde das gesamte zu gießende Material beeinflussen und nicht nur die Randbereiche, wie es bei Graphitkokillen ohne Schutzüberzug der Fall wäre.

Es wurden im Rahmen dieser Arbeit keine Veröffentlichungen gefunden, die Materialien vorstellen, die diesen Forderungen gerecht werden.

3. Verfahrenstechnische Grundlagen für die Dimensionierung

3.1. Niederdruck-Gießverfahren

Die Anordnung beim Niederdruck-Gießverfahren besteht aus einem Druckbehälter, einem Tiegel oder Ofen, der sich in dem Druckbehälter befindet und einem Steigrohr, daß in die Schmelze hineinragt und oben aus dem Druckbehälter herausgeführt wird. Auf das Steigrohr wird die zu füllende Form aufgesetzt. Durch Erhöhung des Druckes p_1 im Druckbehälter wird die Schmelze in das Steigrohr gedrückt und nach oben in die Form gefördert (Bild 7).

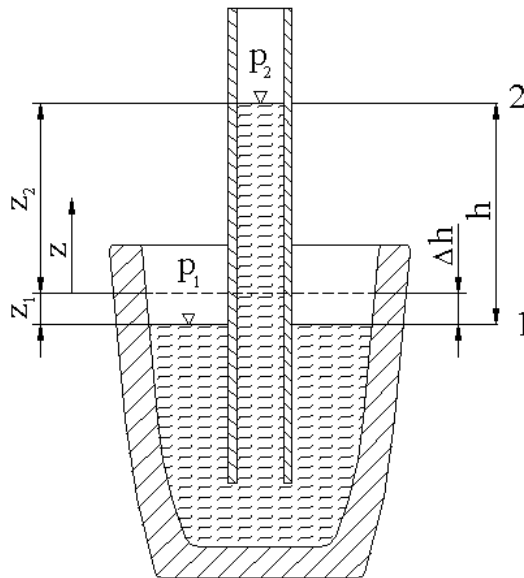


Bild 7: Prinzip des Niederdruck-Gießverfahrens

Es ist ein linearer Zusammenhang zwischen der Steighöhe und der Druckdifferenz zu verzeichnen, der sich nach der Formel

$$h = \frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} \quad \text{G.2}$$

ergibt. Die Steighöhe h bezieht sich dabei auf die Höhe über der Schmelzeoberfläche. Die Schmelzeoberfläche senkt sich aber während des Gießens um den Betrag Δh ab. Dieser Wert hängt vom geförderten Schmelzevolumen und dem Flächeninhalt der

Schmelzebadoberfläche ab. Das zu fördernde Schmelzevolumen setzt sich aus dem Schmelzevolumen im Formhohlraum und im Steigrohr zusammen. Es wird aus dem Tiegel entnommen. Wenn das zu fördernde Schmelzevolumen sehr viel kleiner als das Volumen des Tiegels ist und der Flächeninhalt der Schmelzebadoberfläche groß ist, kann der Betrag Δh vernachlässigt werden.

Das Niederdruck-Gießverfahren ist dadurch gekennzeichnet, daß sich der Überdruck im Druckbehälter im Bereich von 0 bis 0,1 MPa bewegt. Damit sind die maximal erreichbaren Steighöhen bzw. der maximale Überdruck der Schmelze in der Form vorgegeben. Die Steighöhe, die sich im Gleichgewichtszustand einstellt, ist also, wie aus Formel G.2 ersichtlich, nur vom Druck abhängig. Die Dichte wird durch das zu vergießende Material bestimmt. So ist mit dem Werkstoff Eisen eine maximale Steighöhe von 1,477 m bei einer Dichte von 6900 kg/m^3 und einem Druck von 0,1 MPa zu erreichen. Dies soll für die Laboranlage ausreichen. Für die Dimensionierung der Niederdruckgießanlage wird ein maximaler Druck von 0,1 MPa angenommen. Bild 8 zeigt die mit einem bestimmten Druck erreichbaren Steighöhen für Aluminium, Eisen und Kupfer im flüssigen Zustand. Die entsprechenden Werte für die Dichte sind Tabelle 1 entnommen.

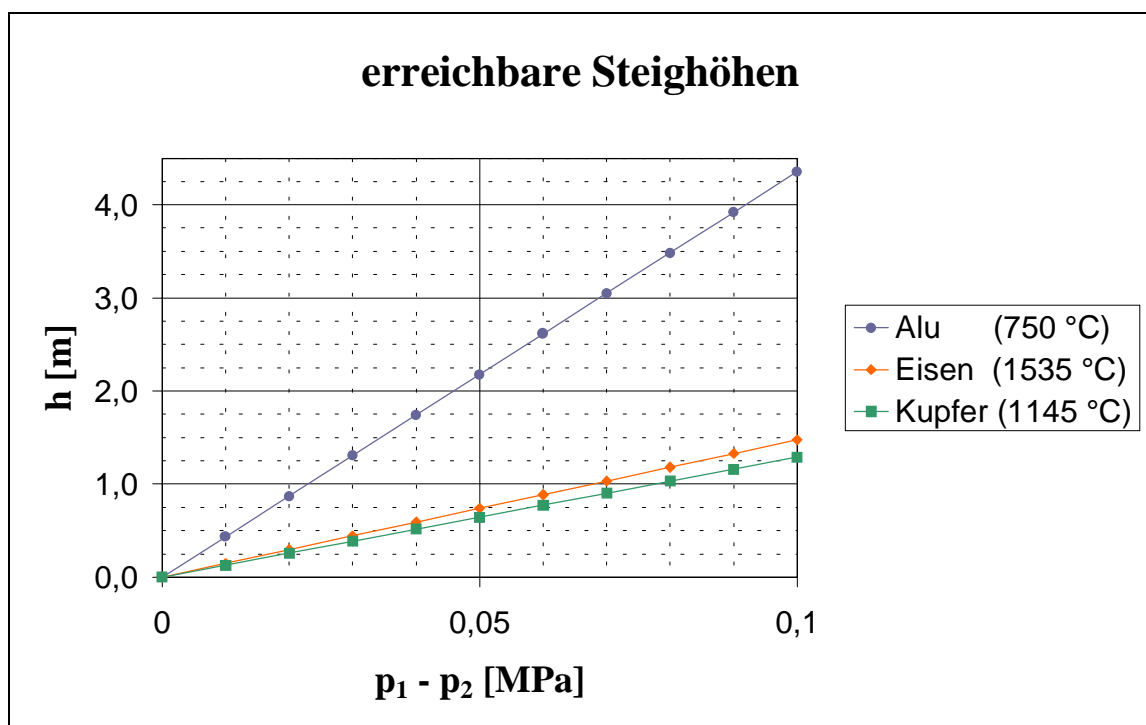


Bild 8: Erreichbare Steighöhen

3.2. Strömungstechnik

Für ein qualitätsgerechtes Gußstück spielt die Formfüllgeschwindigkeit eine herausragende Rolle. Dabei gilt es, die optimale Geschwindigkeit zu finden. Sowohl eine zu hohe als auch eine zu niedrige Geschwindigkeit beeinflussen den Gießprozeß negativ und können zu fehlerhaften Gußstücken führen. Eine zu niedrige Gießgeschwindigkeit kann dazu führen, daß die Schmelze erstarrt, bevor der Formhohlraum vollständig gefüllt ist, so daß Kaltlauf oder Kaltschweißungen entstehen. Eine zu große Geschwindigkeit kann andererseits dazu führen, daß eine stark turbulente Strömung entsteht, in der Gasblasen und Formstoffbestandteile verwirbelt werden und so ein minderwertiges oder unbrauchbares Gußstück entsteht. Außerdem kann es in der Form zu Auswaschungen an Aufprallstellen kommen. Die Form wird damit unbrauchbar bzw. muß oft nachgearbeitet werden.

Die Geschwindigkeit der Schmelze kann mit Hilfe der Bernoulli - Gleichung mit Verlustglied

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + p_1 + \rho \cdot g \cdot z_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + p_2 + \rho \cdot g \cdot z_2 + \Delta p_v + \rho \cdot \int_{s_1}^{s_2} \frac{\partial v}{\partial t} ds \quad \text{G.3}$$

ermittelt werden. Unter der Voraussetzung, daß das Volumen der Schmelze im Tiegel sehr viel größer als das zu fördernde Schmelzevolumen ist, wird entsprechend Bild 7 Δh sehr klein ($\Delta h \rightarrow 0$). Daraus folgt $z_1 = 0$ und $v_1 = 0$. Für den stationären Fall entfällt das Integral. Der Druckverlust Δp_v ergibt sich aus Reibungs- und Widerstandswerten, der Dichte und der Geschwindigkeit.

$$\Delta p_v = \sum \zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 \quad \text{G.4}$$

Druckverluste sind eine Folge der inneren Reibung. Der Reibungswert ζ ergibt sich für Rohre mit Kreisquerschnitt nach Gleichung G.5.

$$\zeta = \frac{\lambda_R \cdot l}{d} \quad \text{G.5}$$

Die Rohrreibungszahl λ_R ist abhängig von der Strömungsart. Der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung erfolgt, wenn die Reynoldszahl Re einen kritischen Wert überschreitet.

Der kritische Wert für Rohre mit Kreisquerschnitt beträgt $Re_k = 2320$. Die Reynoldszahl ergibt sich aus der Geschwindigkeit, dem Rohrdurchmesser und der kinematischen Viskosität nach Gleichung G.6.

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad G.6$$

Die kinematische Viskosität ist nach Gleichung G.7 durch die dynamische Viskosität und die Dichte bestimmt

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad G.7$$

Für die Rohrreibungszahl gibt es mehrere Formeln [5]. Diese sind jeweils für einen bestimmten Reynoldszahlbereich gültig.

Die Druckverluste treten aber auch an Stellen auf, an denen sich die Geometrie des Rohres ändert. Als Beispiel seien Rohreinläufe genannt. Der Widerstandswert für den Rohreinlauf beim Niederdruck-Gießverfahren beträgt $\zeta = 0,6 \dots 1,0$ für gebrochene Kanten. Weitere Druckverluste treten bei Querschnittsänderungen auf. Aus den Gleichungen G.3 und G.4 ergibt sich die Geschwindigkeit im Steigrohr

$$v_2 = \sqrt{\frac{2}{\rho \cdot (1 + \sum \zeta)} \cdot (p_1 - p_2 - \rho \cdot g \cdot z_2)} \quad G.8$$

Durch Umstellen der Gleichung G.2 läßt sich der erforderliche Druck zum Erreichen einer bestimmten Höhe errechnen.

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot h \quad G.9$$

Die Steighöhe z_2 ergibt sich aus dem bis dahin geförderten Schmelzevolumen und den Querschnittsänderungen nach Gleichung G.10

$$\dot{V} = A \cdot v = \text{const.} \quad G.10$$

Um Einschlüsse infolge von Verwirbelungen zu vermeiden, sollte eine laminare Strömung angestrebt werden.

In Bild 9 ist der Zusammenhang zwischen der Strömungsart, dem Steigrohrdurchmesser, der Geschwindigkeit und der Formfüllzeit für zwei unterschiedliche Steigrohrdurchmesser dargestellt.

Die Steigrohrdurchmesser betragen in diesem Beispiel $d = 25 \text{ mm}$ und $d = 50 \text{ mm}$. Die Formfüllzeit t bezieht sich auf ein zu füllendes Volumen, daß sich aus einer angenommenen Gußstückmasse von $m = 25 \text{ kg}$ und der Dichte von Eisen $\rho = 6900 \text{ kg/m}^3$ ergibt.

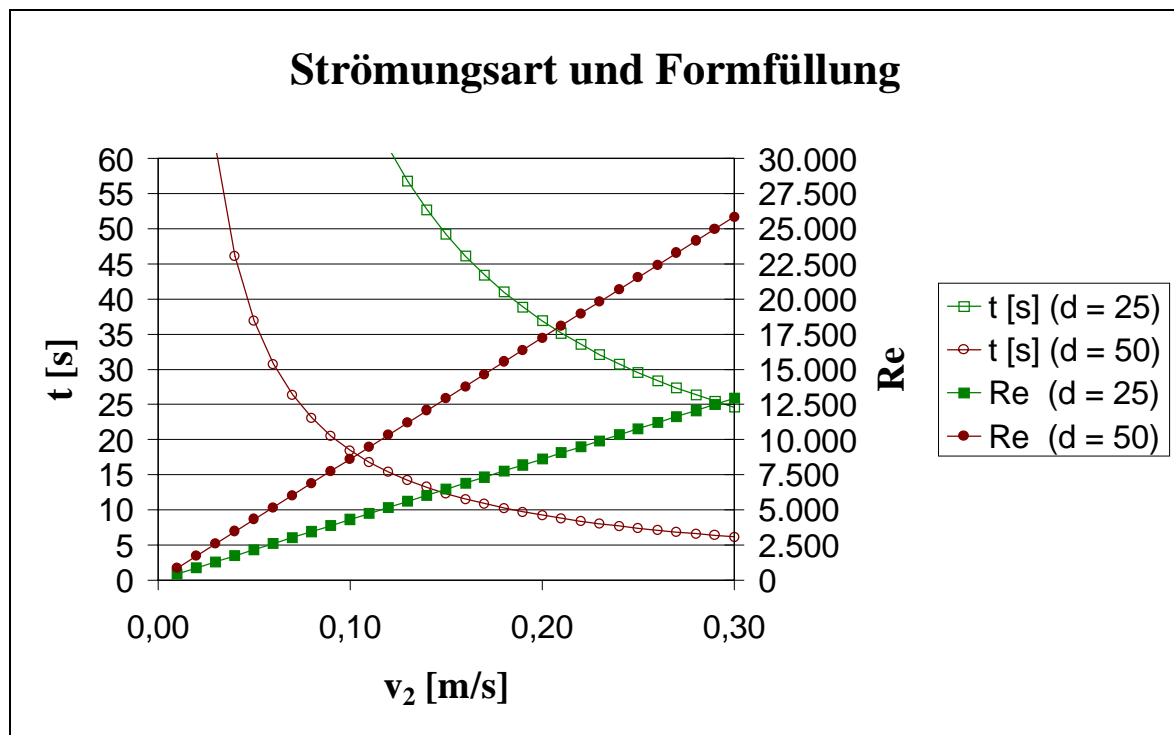


Bild 9: Strömungsart in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit im Steigrohr

Bei einer kinematischen Viskosität von $\nu = 0,00000058 \text{ m}^2/\text{s}$ für Gußeisen nach Tabelle 1 ist eine laminare Strömung mit $Re < 2320$ für einen Steigrohrdurchmesser von $d = 25 \text{ mm}$ nur bei Durchflußgeschwindigkeiten unter $0,06 \text{ m/s}$ zu erreichen. Die Formfüllzeit beträgt für ein Gußstück mit einer Masse von 25 kg ca. 120 s . Für einen Steigrohrdurchmesser von $d = 50 \text{ mm}$ wird die kritische Reynoldszahl bei Geschwindigkeiten von ca. $0,03 \text{ m/s}$ erreicht. Die Formfüllzeit beträgt ca. 60 s . Die hier genannten Werte sind Grenzwerte. Um eine rein laminare Strömung zu gewährleisten, müssen die Geschwindigkeiten noch geringer sein. Die Formfüllung dauert noch länger. In vielen Fällen muß deshalb darauf verzichtet werden, eine rein laminare Strömung zu erreichen.

3.3. Thermodynamische Grundlagen

Ein einfaches thermodynamisches Modell des Wärmedurchgangs durch eine ebene mehrschichtige Wand nach Bild 10 soll die thermodynamischen Verhältnisse darstellen. Es sind die verwendeten Variablen entsprechend des Bereiches ihrer Gültigkeit eingetragen. Mit diesem einfachen Modell läßt sich eine Abschätzung der beim Gießen auftretenden Temperaturverluste realisieren. Die Temperaturverhältnisse und Wärmeverluste bei der Auslegung einer Niederdruck-Gießanlage können damit ebenfalls ermittelt werden. Der Unterschied besteht darin, daß beim Gießen der Wärmeübergang durch Strahlung zwischen der Schmelze und der Wand 1 entfällt. Der Wärmeübergang durch Konvektion erfolgt in jedem Fall durch eine Fluidströmung parallel zu den Wandflächen. Die Wände eins bis vier können sowohl Isolierschichten in einer Gießanlage, als auch Formstoffschichten in einer Gießform darstellen. Die Umgebung wird als unendlich angenommen. Das bedeutet, daß die Temperatur T_2 immer konstant ist.

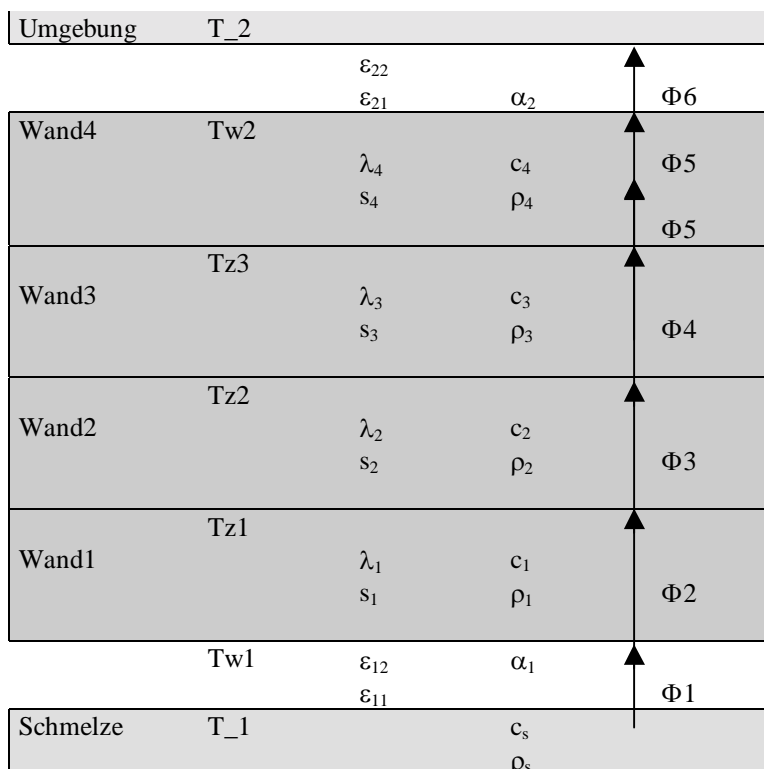


Bild 10 : thermodynamischer Schichtaufbau des Modells

Nach den folgenden Formeln lassen sich die Temperaturen und die Wärmeströme an den bezeichneten Stellen des Modells unter Annahme verschiedener Parameter berechnen.

Die Strahlungskonstante für den Wärmeübergang zwischen zwei Flächen resultiert aus der Strahlungskonstanten für den schwarzen Körper und den Emissionswerten ε für die Oberflächen der beiden Körper. Sie fließt in den Wärmeübergangskoeffizienten α_s ein.

$$C_{12} = \frac{C_{\text{Schwarz}}}{\frac{1}{\varepsilon_{11}} + \frac{1}{\varepsilon_{12}} - 1} \quad \text{G.11}$$

$$\alpha_{1s} = C_{12-1} \cdot \frac{T_{-1}^4 - T_{w1}^4}{T_{-1} - T_{w1}} \quad \text{G.12}$$

$$\alpha_{2s} = C_{12-2} \cdot \frac{T_{w2}^4 - T_{-2}^4}{T_{w2} - T_{-2}} \quad \text{G.13}$$

Der Wärmeübergangskoeffizient α_k bei Wärmeübergang durch Konvektion ist abhängig von der Nußeltschen Kennzahl. Diese ist mit $Nu = f(Re, Pr, Gr, l)$ von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Sie wird experimentell ermittelt.

$$\alpha_k = Nu \cdot \frac{\lambda}{l} \quad \text{G.14}$$

Für Luft wurden die folgenden Werte für α_k ermittelt [31]:

$$\alpha_k = 3 \dots 20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad \alpha_k = 10 \dots 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

(freie Konvektion) (erzwungene Konvektion)

Der Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung und Konvektion ergibt sich aus der Addition beider Koeffizienten.

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_k \quad \text{G.15}$$

Mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten wird der Wärmedurchgang durch die gesamte Wand beschrieben.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \frac{s_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \text{G.16}$$

Der Wärmestrom durch eine mehrschichtige Wand ist gekennzeichnet durch den Wärmedurchgangskoeffizienten, die Fläche und das Temperaturgefälle.

$$\Phi = k \cdot A \cdot (T_{-1} - T_{-2}) \quad \text{G.17}$$

In den Gleichungen G.18 und G.19 für die einzelnen Wärmeströme bedeutet T1 die höhere Temperatur und T2 die niedrigere Temperatur.

$$\Phi = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad \text{G.18}$$

$$\Phi = \alpha \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad \text{G.19}$$

Mit Gleichung G.17 für den gesamten Wärmestrom und den Gleichungen G.18 und G.19 für die einzelnen Wärmeströme können dann die Temperaturen an den Grenzen der einzelnen Schichten berechnet werden.

$$T_{w1} = T_{-1} - \frac{k}{\alpha_1} \cdot (T_{-1} - T_{-2}) \quad \text{G.20}$$

$$T_{w2} = T_{-2} + \frac{k}{\alpha_2} \cdot (T_{-1} - T_{-2}) \quad \text{G.21}$$

$$T_{z1} = T_{w1} - k \cdot \frac{s_1}{\lambda_1} \cdot (T_{-1} - T_{-2}) \quad \text{G.22}$$

$$T_{z2} = T_{z1} - k \cdot \frac{s_2}{\lambda_2} \cdot (T_{-1} - T_{-2}) \quad \text{G.23}$$

$$T_{z3} = T_{z2} - k \cdot \frac{s_3}{\lambda_3} \cdot (T_{-1} - T_{-2}) \quad \text{G.24}$$

Die für die Erstarrung einer Metallschmelze maßgeblichen Parameter sind die Wärmeleitfähigkeit der Schmelze und des Formstoffes sowie ihre spezifischen Wärmekapazitäten. Es ist davon auszugehen, daß die Formfüllgeschwindigkeit ebenfalls das Erstarrungsverhalten beeinflußt und durch ihre Steuerung auch die gerichtete Erstarrung unterstützt werden kann. Wlodawer [14] beschreibt die Grundlagen der Erstarrung für Stahlguß und zeigt die Möglichkeiten zur Lenkung der Erstarrung durch geeignete Maßnahmen auf, wie zum Beispiel die Gestaltung des Gußstücks, den Einsatz von Kokillen zur Verlängerung der Endzonen u.a. Er beschreibt die Vorerstarrung während des Gießens. Die Randzonen, die bereits während des Gießens erstarren, werden bei turbulenter Strömung durch Vermischung des Stahles mit Luft um so größer.

Für die Berechnung von instationären thermodynamischen Vorgängen beim Gießen sind die folgenden Formeln von Bedeutung.

$$W = m \cdot c \cdot (T_1 - T_2) \quad \text{G.25}$$

$$\Phi = \frac{W}{t} \quad \text{G.26}$$

Die Wärmeübertragung durch Strahlung betrifft beim Gießen den Bereich von der Schmelzefront zu den gegenüberliegenden Formwänden. Nachfolgend erfolgt der Wärmetransport durch Konvektion im flüssigen Metall, dem Wärmeübergang zwischen dem flüssigen Metall und dem festen Formwerkstoff nach G.19 und der Wärmeleitung im festen Formwerkstoff nach G.18. Die maximal verfügbare Wärmemenge ergibt sich aus der Gußteilmasse, der spezifischen Wärmekapazität des Gießmetalls und der Gießtemperatur nach G.25. Der Wärmestrom entspricht der pro Zeiteinheit transportierten Wärmemenge nach G.26. Über den Volumen- oder Massenstrom der Schmelze und dem Wärmestrom in den Formwerkstoff hinein ist eine Kopplung zwischen Formfüllgeschwindigkeit und Erstarrung möglich. Eine Beeinflussung der gerichteten Erstarrung des Gußwerkstoffes durch die gesteuerte Formfüllung wird dadurch prognostizierbar. Insbesondere lassen sich die Formfüllgeschwindigkeiten berechnen, die zur sicheren und vollständigen Formfüllung von dünnwandigen und extrem dünnwandigen Gußteilen erforderlich sind. Die beim Niederdruckgießen vorzugebenden Druckanstiegskoeffizienten können damit ermittelt werden.

4. Niederdruck-Laborgießanlage

4.1. Niederdruck-Gießofen

Der für die Versuche verwendete Niederdruck-Gießofen besteht aus einem Druckbehälter, einer Heizung, einem Druckluftanschluß, einem Steigrohr, Isolationsmaterial und einem Tiegel (Bild 11). Die Befestigung der Formen erfolgt über vier Gewindestäbe, die im Deckel befestigt werden. Die Heizung wird als Widerstandsheizung ausgeführt. Mit dieser Heizung sind Temperaturen von bis zu 1200 °C erreichbar. Die beim Stahlguß erforderlichen Temperaturen sollen auf der Industrieanlage mit einem Induktionsofen erreicht werden.

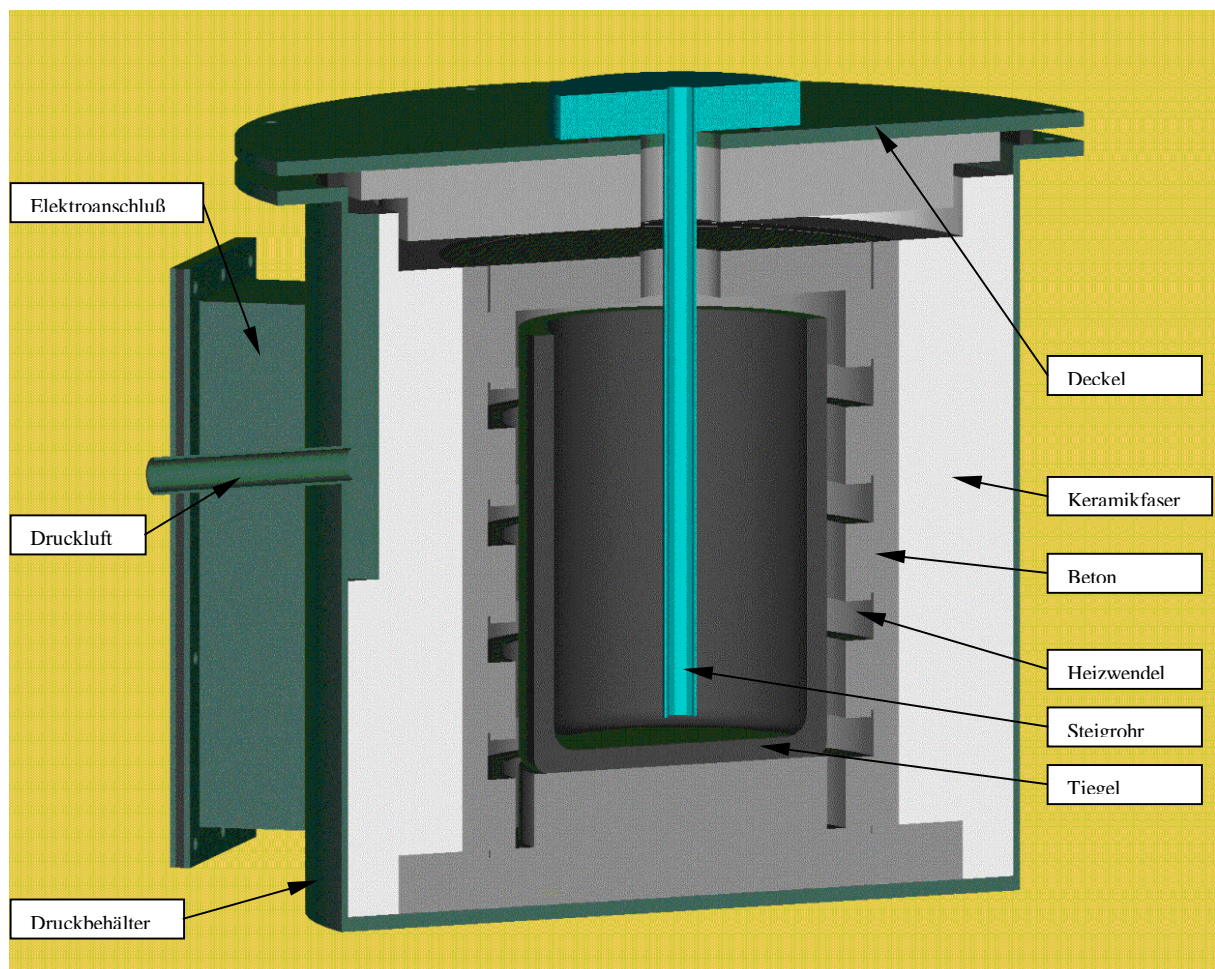


Bild 11: Aufbau des Niederdruckgießofens

Weiterhin gehören zu der Laboranlage eine Temperaturreglung und eine Druckluftsteuerung.

4.2. Erwarteter Temperaturverlauf im Laborgießofen

Die Erwärmung des Ofens ist für die Auswahl der Werkstoffe (Bleche, Schrauben und Isolierung) von Bedeutung.

Der Temperaturverlauf, der sich im Ofen einstellt, ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. In Tabelle 3 sind die für die Berechnung des Temperaturverlaufes im Ofen notwendigen Werte und Zwischenergebnisse angegeben. Dabei wurde feuerfester Beton als Vorderisolierung und Keramikfaser als Hinterisolierung gewählt. Der Wärmeübergangskoeffizient α_{1K} wird mit $0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und α_{2K} mit $4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ angenommen. Das bedeutet, daß im Ofenraum kein Wärmeübergang durch Konvektion erfolgt und an der äußeren Ofenwand nur eine geringe freie Konvektion besteht. Die Werte für die Wärmeleitfähigkeit sind entsprechenden Datenblättern von Firmen [48][49][50] entnommen. Die Emissionswerte können wie folgt angenommen werden [8] :

- $\varepsilon_{11} = 0,3$ Stahl (flüssig, entschlackt),
- $\varepsilon_{12} = 0,8$ Keramikfaser (matt, weiß),
- $\varepsilon_{21} = 0,9$ (Stahl, fest, oxidiert) und
- $\varepsilon_{22} = 1,0$ (Umgebung, sehr großer Raum).

Die Temperaturen an den Oberflächen und den Schichtgrenzen wurden mit den Gleichungen G.20 bis G.24 berechnet.

| | | | | |
|--------------------|--|-------------|---------------|----------------|
| T1 | 1200 °C | λ_1 | 0,32 W/(m*K) | (Beton) |
| ε_{11} | 0,3 | s_1 | 0,050 m | |
| ε_{12} | 0,8 | λ_2 | 0,10 W/(m*K) | (Keramikfaser) |
| T2 | 20 °C | s_2 | 0,050 m | |
| ε_{21} | 0,9 | λ_3 | 0,08 W/(m*K) | (Keramikfaser) |
| ε_{22} | 1,0 | s_3 | 0,060 m | |
| C_s | 5,67E-08 W/(m ² *K ⁴) | λ_4 | 52,00 W/(m*K) | (Stahl) |
| | | s_4 | 0,002 m | |
| C_{12_1} | 1,58E-08 W/(m ² *K ⁴) | | | |
| C_{12_2} | 5,10E-08 W/(m ² *K ⁴) | | | |
| α_{1s} | 108,417 W/(m ² *K) | | | |
| α_{1k} | 0,000 W/(m ² *K) | | | |
| α_1 | 108,417 W/(m ² *K) | | | |
| α_{2s} | 0,359 W/(m ² *K) | | | |
| α_{2k} | 4,000 W/(m ² *K) | | | |
| α_2 | 4,359 W/(m ² *K) | | | |
| k | 0,607 W/(m ² *K) | | | |

| | |
|-----|---------|
| Tw1 | 1193 °C |
| Tz1 | 1081 °C |
| Tz2 | 722 °C |
| Tz3 | 184 °C |
| Tw2 | 184 °C |

Tabelle 3 : Werte für die Berechnung des Temperaturverlauf im Laborgießofen

Bild 12 zeigt den interpolierten Temperaturverlauf in der Ofenwand. Die Forderung, daß die Temperatur an der äußeren Ofenwand nicht größer als 200 °C sein soll, wird erfüllt. Damit kann auf eine Kühlung der Behälterwand verzichtet werden. Die durchgeführte Kontrollmessung ergab, daß die berechneten Temperaturen der Realität entsprechen und die angenommenen Werte für den Wärmeübergang und die Strahlungskonstanten richtig eingeschätzt wurden.

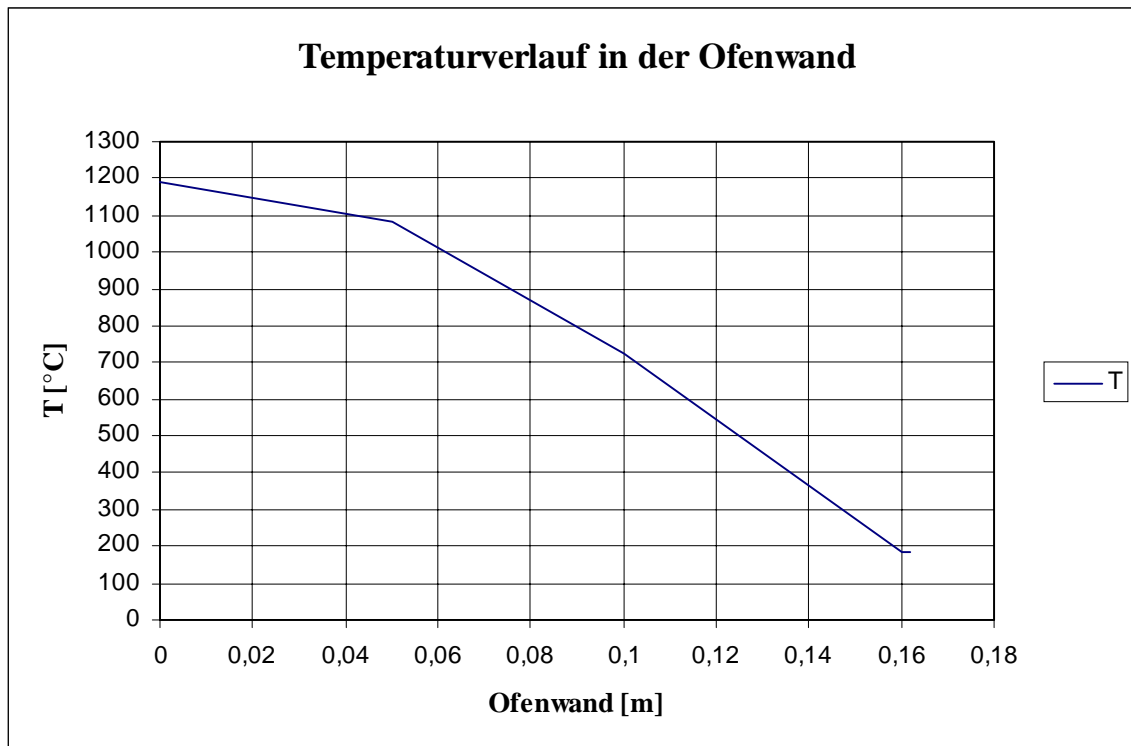


Bild 12: Erwarteter Temperaturverlauf im Laborgießofen

4.3. Temperaturreglung

Die Heizung des Niederdruckgießofens erfolgt über vier Heizwendel, von denen je zwei in Reihe geschaltet sind. Die Schaltung ist in Bild 13 dargestellt.

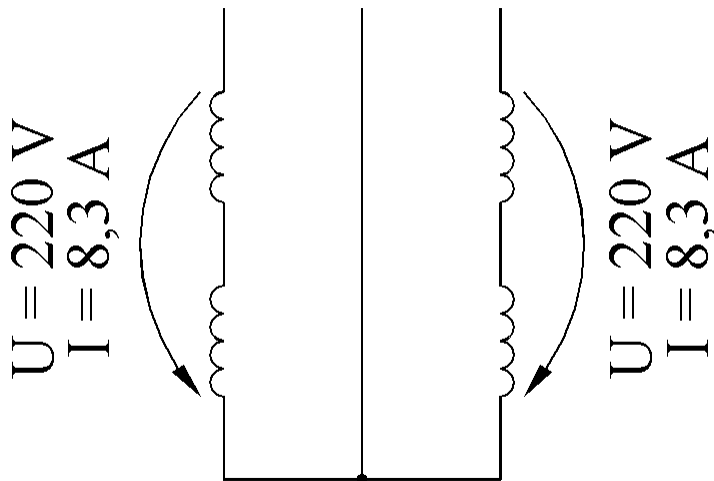


Bild 13: Schaltung der Heizung

Die Heizung hat eine Leistungsaufnahme von 3652 W. Die Temperaturreglung des Ofens erfolgt über einen Fallbügelregler. Die Temperatur wird mit einem NiCr-Ni-Mantelthermoelement ($\varnothing 1 \text{ mm}$) an der Außenwand des Tiegels gemessen. Der Anzeige- und Einstellbereich des Reglers ist in Bild 14 dargestellt. Die gewünschte Temperatur kann am Drehknopf 1 eingestellt werden.

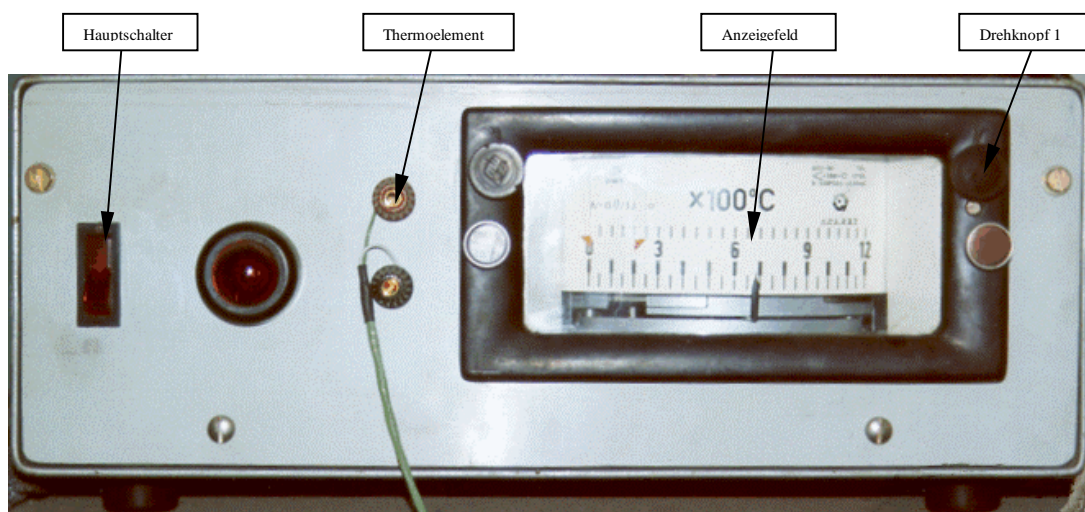


Bild 14: Fallbügelregler

Wenn der Ofen längere Zeit unbenutzt war, ist eine Vorheizphase von ca. zwei Stunden bei 400 °C bei ausreichender Belüftung notwendig, um eine Kondenswasserbildung zu verhindern. Bild 15 zeigt die Aufheiz- und Abkühlkurve des Niederdruckgießofens ohne Schmelzgut. Der Tiegel wurde dabei mit aufgeheizt.

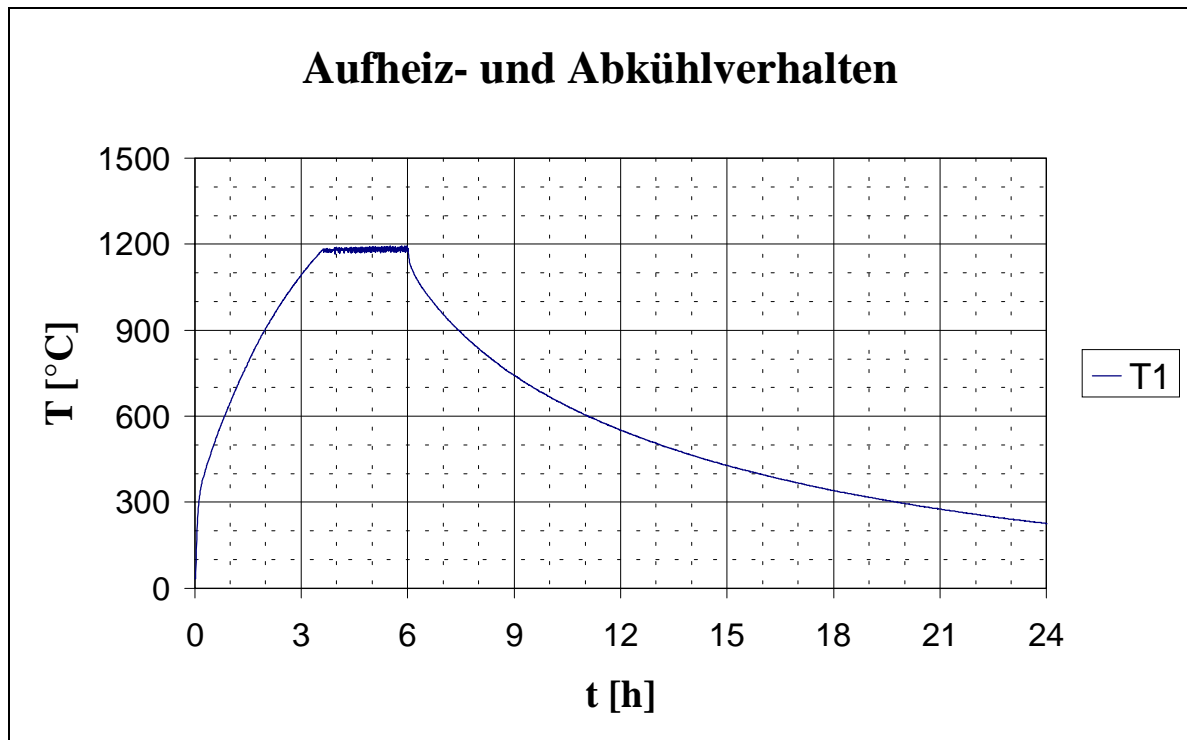


Bild 15: Aufheizverhalten des Laborgießofens (vorgeheizt auf 200 °C)

Die Temperatur T1 entspricht der Temperatur am Thermoelement. Aus dem Bild 15 geht hervor, daß die Aufheizphase von 30 °C auf 1200 °C ohne Schmelzgut ca. dreieinhalb Stunden dauert. Aus den gemessenen Temperaturen im Ofen ergibt sich eine Gesamtwärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,12 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$. Die Leistung der Heizung reicht für den Laborbetrieb aus, um die mit der Widerstandsheizung mögliche Temperatur von 1200 °C in einer annehmbaren Zeit zu erreichen und zu halten. Das Schmelzen von Gußeisen im Niederdruckgießofen ist nicht möglich. Dagegen ist das Schmelzen von Aluminium möglich. Der Niederdruckgießofen ist also für Gußeisen und Stahl als Warmhalteofen zu verwenden. Bei den Versuchen mit höherschmelzenden Eisen-Kohlenstoff-Legierungen muß das Gießmetall entsprechend überhitzt werden. Die notwendige Überhitzungstemperatur richtet sich nach der Versuchsdauer.

4.4. Druckluftsteuerung

4.4.1. Pneumatikschaltplan

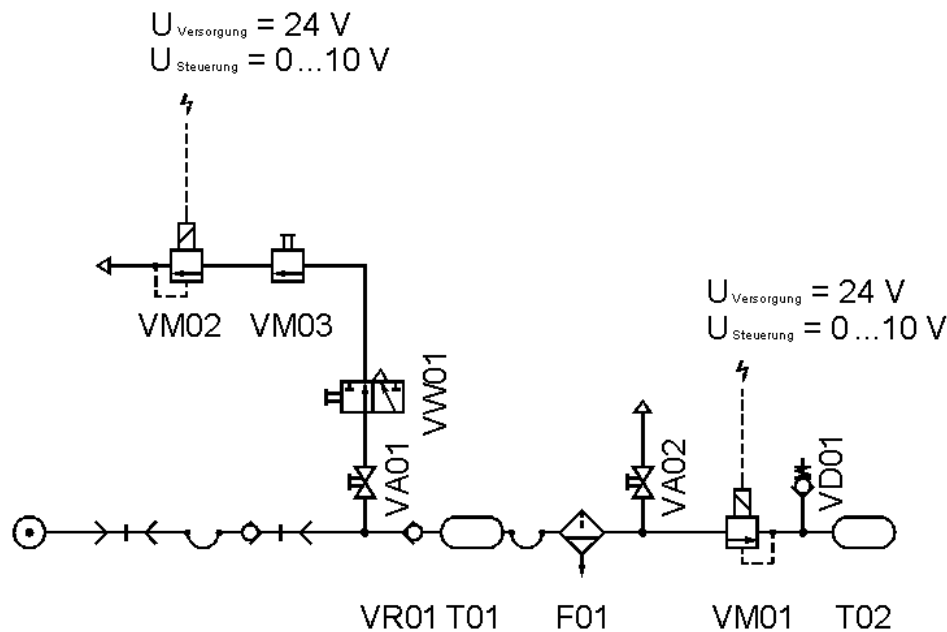


Bild 16: Druckluftschaltplan

Legende:

| | | |
|------|---|---|
| VA01 | 2-Wege-Kugelhahn ½" | |
| VA02 | 2-Wege-Kugelhahn ½" | |
| VW01 | 3-Wege-Kugelhahn ½" | |
| VR01 | Rückschlagventil ½" | |
| VD01 | 4 Sicherheitsventile ¾" Riegler Bestell-Nr. 227.66 B | Öffnungsdruck: 1 bar Abblaseleistung: 796 l/min |
| VM01 | Druckregelventil NW12 Mannesmann-Rexroth Nr. 885 006 603 0 0598 | $p = 0 \dots 6 \text{ bar}$ Wiederholgenauigkeit = 0,01 bar $Q = 2600 \text{ NL/min}$ |
| VM02 | Druckregelventil NW12 Mannesmann-Rexroth Nr. 885 006 650 0 0698 | $p = 0 \dots 1,5 \text{ bar}$ |
| VM03 | Druckreduzierventil Berluto DRV 200 | |
| F01 | Filter C25 1" Mannesmann-Rexroth Bestell-Nr. 535 123 600 0 | |
| T01 | Druckluftspeicher Mannesmann-Rexroth Bestell-Nr. 351 300 005 0 | 40 l; 10 bar |
| T02 | Niederdruckofen | Zeichnungsnummer 001.98.01.000 |

4.4.2. Steuerungsschaltplan (PC)

Die Steuerung der Druckregelventile VM01 und VM02 (Bild 16) erfolgt durch einen PC unter Verwendung einer PC-AD/DA-Karte mit zwei analogen Ausgängen und der Software „Workbench“ der Firma Strawberry Tree Incorporated. Das Druckregelventil VM02 dient zur Realisierung des Gegendruckgießverfahrens und ist für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen nicht relevant.

Aus Sicherheitsgründen wurden zwischen den PC und dem Druckregelventil VM01 zwei Schalter eingebaut (Bild 17). Der erste Schalter ist ein fest installierter Notaus-Schalter. Der zweite ist ein Endschalter, der beim Aufsetzen der abzugießenden Form den Stromkreis schließt. Dadurch wird ein versehentliches Auslösen des Gießvorganges ohne aufgesetzte Form verhindert.

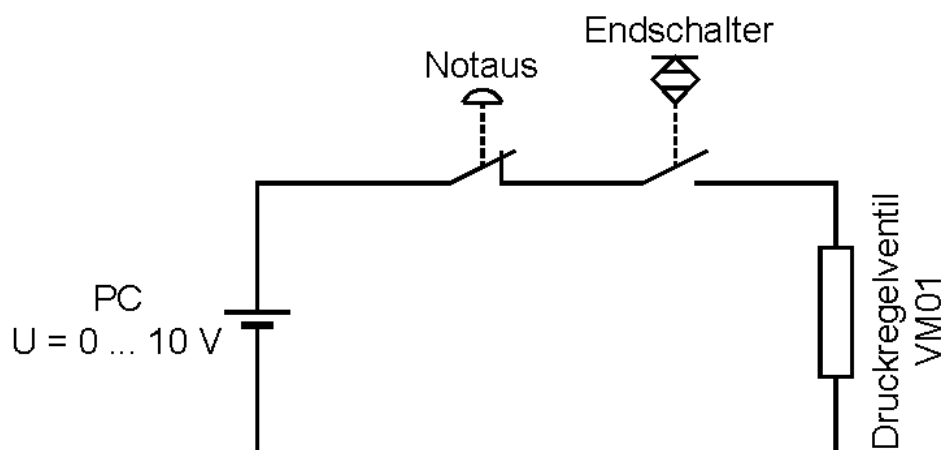


Bild 17: Schaltplan der Drucksteuerung zwischen PC und Druckregelventil VM01

Der Gießvorgang wird über die Software „Workbench“ ausgelöst und gesteuert. Das Programm muß mit

w.bat

gestartet werden. Im Programm „Workbench“ muß die Datei „DR_STRG05.WBB“ im Verzeichnis „C:\WB“ geöffnet werden. Dadurch wird die in Bild 18 dargestellte Oberfläche eingeblendet.

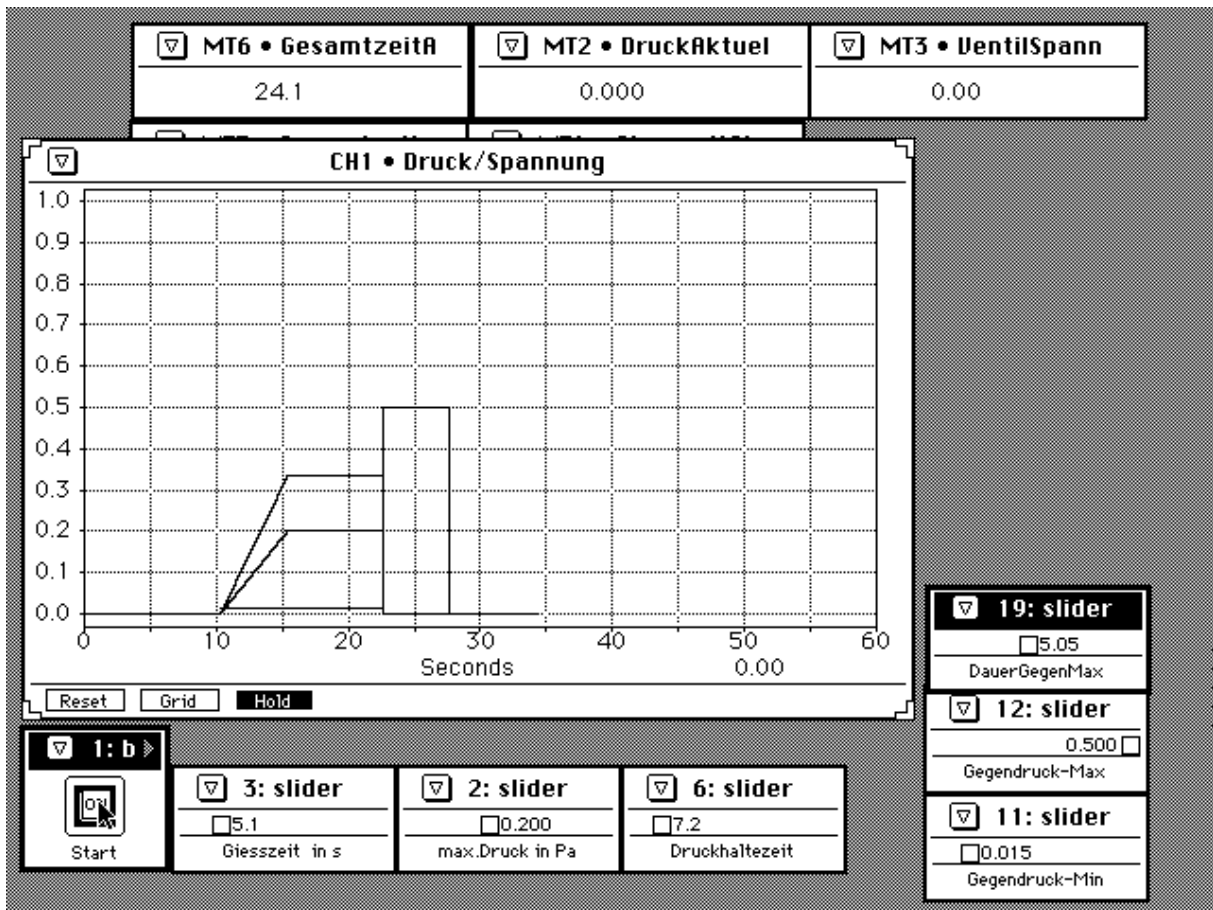


Bild 18: Screenshot der Bedieneroberfläche

Im Diagramm der Bedieneroberfläche ist der Verlauf des Gießprozesses visualisiert. Dort ist der Druck über der Zeit aufgetragen. Über die „slider“ 2, 3, 6, 11, 12 und 19 sind sechs Parameter einstellbar. Diese Parameter sind:

| Parameter | slider | Einheit | Ventil | Erklärung |
|----------------|--------|---------|--------|---|
| Gießzeit | 3 | s | VM01 | Zeit, in der der Druck bis auf den Endwert linear erhöht wird |
| max. Druck | 2 | bar | VM01 | Enddruck (Gießdruck) |
| Druckhaltezeit | 6 | s | VM01 | Zeitspanne, in der der Enddruck konstant gehalten wird |
| DauerGegenMax | 19 | s | VM02 | Zeit, in der der max. Gegendruck nach Abfall des Gießdruckes konstant gehalten wird |
| Gegendruck-Max | 12 | bar | VM02 | Druck, der nach Abfall des Gießdruckes eingestellt wird |
| Gegendruck-Min | 11 | bar | VM02 | Druck, der während des Gießens aufgebaut wird |

Die „slider“ 11, 12 und 19 betreffen das Ventil VM02 und haben für die Arbeit keine Bedeutung. Durch das Sperren des Absperrventils VA01 wird dieser Zweig der Druckluftleitung abgekoppelt und die Einstellungen dieser Parameter sind unerheblich. Der mit dem Druckregelventil VM01 eingestellte Druck entspricht dem Druck p_1 in Gleichung G.8. Die Geschwindigkeit der Schmelze im Steigrohr läßt sich über die zeitliche Änderung dieses Druckes steuern. Mit den Parametern Gießzeit und max. Druck läßt sich ein linearer Druckanstieg realisieren. Andere Druckanstiege sind durch entsprechendes Programmieren des Steuerungsplans (Bild 19) möglich.

Der Gießprozeß wird dann durch Klicken auf den Knopf „Start“ ausgelöst und kann dort auch abgebrochen werden. Eine Ist-werterfassung ist nicht implementiert.

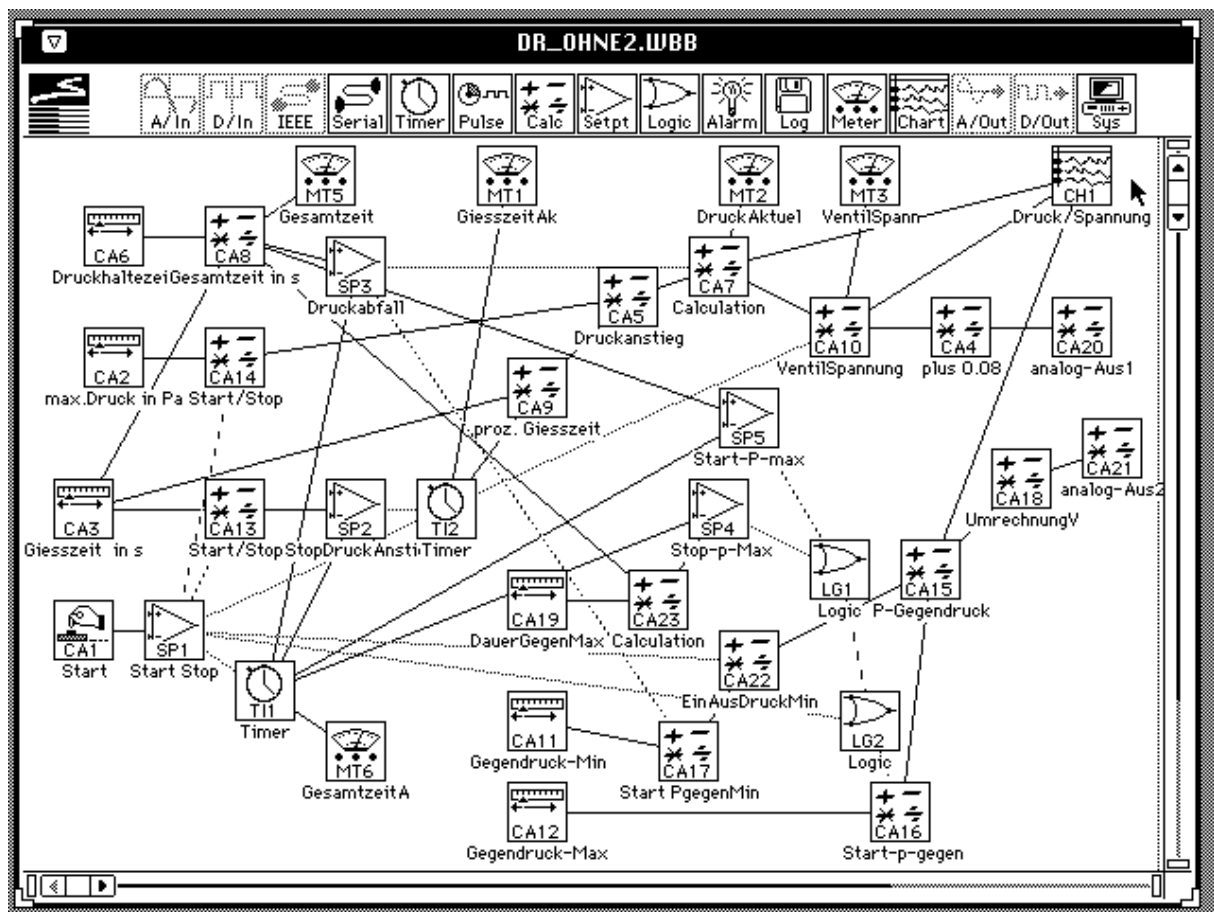


Bild 19: Screenshot der Steuerung

Bild 19 zeigt den Aufbau der Steuerung. Die Programmierung erfolgt streng von links nach rechts. Sprünge zu weiter links stehenden Icons sind nicht möglich. Die Icons, die durch Linien miteinander verbunden sind, liefern jeweils die Eingangs- bzw. Ausgangswerte. So ist beispielsweise der Ausgangswert von CA1 (Start) der Eingangswert von SP1 (Start Stop).

Die Icons stellen Knoten dar, in denen Funktionen ausgeführt werden. Diese werden in Gruppen zusammengefaßt. Die Kürzel der Gruppen erscheinen in den Icons und sind in der Reihenfolge ihrer Erstellung durchnummeriert. So steht das Kürzel CA für eine Kalkulation. Die in den Knoten ausgeführten Funktionen sind in Tabelle 4 dargestellt.

| Kurzbezeichnung | Funktion | Name | Bedeutung |
|-----------------|-----------------------|-----------------|--|
| CA1 | Button(2) | Start | Startet den Gießvorgang |
| CA10 | 1,667xCA7*1xSP1 | VentilSpannung | Berechnung der Ventilspannung |
| CA11 | slider(0.0-0.1) | Gegendruck-Min | Einstellen des min. Gegendruck |
| CA12 | slider(0.0-0.5) | Gegendruck-Max | Einstellen des max. Gegendruck |
| CA13 | 1xCA3*1xSP1 | Start/Stop | Start/Stop - Bedingung (Gießdruck) |
| CA14 | 1xCA2*1xSP1 | Start/Stop | Start/Stop - Bedingung (Gießzeit) |
| CA15 | CA22+CA16 | p-Gegendruck | Berechnung des momentanen Gegendrucks |
| CA16 | 1xCA12*1xLG2 | Start-p-gegen | Startet den max. Gegendruck |
| CA17 | 1xCA11*1xSP3 | StartPgegenMin | Startet den min. Gegendruck |
| CA18 | 10xCA15/1.5x1 | UmrechnungV | Berechnung der Ventilspannung |
| CA19 | slider(1.0-10.0) | DauerGegenMax | Einstellen der Dauer des max. Gegendrucks |
| CA2 | slider(0.0-0.5) | Max.Druck in Pa | Einstellen des Gießdrucks |
| CA22 | 1xCA17*1xSP1 | EinAusDruckMin | Start/Stop - Bedingung (min. Gegendruck) |
| CA23 | CA19+CA8 | Calculation | Berechnung der Zeit für das Ende des Gegendrucks |
| CA3 | slider(0.0-30.0) | Giesszeit in s | Einstellen der Gießzeit |
| CA5 | 1xCA9*1xCA14 | Druckanstieg | Berechnung des momentanen Gießdrucks |
| CA6 | slider(0.0-60.0) | Druckhaltezeit | Einstellen der Druckhaltezeit |
| CA7 | 1xSP3*1xCA5 | Calculation | Berechnung des momentanen Gießdrucks |
| CA8 | CA6+CA3 | Gesamtzeit in s | Berechnung der gesamten Gießzeit |
| CA9 | 1xTI2/1xCA3 | proz.Giesszeit | Berechnung der prozentualen Gießzeit |
| CH1 | X=60 secs/12 Y=0-1/10 | Druck/Spannung | Ausgabediagramm: Druck/Spannung |
| LG1 | SP5 AND SP4 | Logic | Start/Stop - Bedingung (Gegendruck) |
| LG2 | SP1 AND LG1 | Logic | Start/Stop - Bedingung (Gegendruck) |
| MT1 | Fixed Point 8!1 | GiesszeitAk | Anzeige: aktuelle Gießzeit |
| MT2 | Fixed Point 6!3 | DruckAktuel | Anzeige: aktueller Druck |
| MT3 | Fixed Point 7!2 | VentilSpann | Anzeige: aktuelle Ventilspannung |
| MT5 | Fixed Point 8!1 | Gesamtzeit | Anzeige: Gesamtzeit |
| MT6 | Fixed Point 8!1 | GesamtzeitA | Anzeige: aktuelle Gesamtzeit |
| SP1 | CA1>0.0 | Start Stop | Start / Stop |
| SP2 | TI1<CA13 | StopDruckAnstie | Stoppt den Druckanstieg |
| SP3 | CA8>TI1 | Druckabfall | Löst den Druckabfall aus |
| SP4 | CA23>TI1 | Stop-p-Max | Stoppt den max. Gegendruck |
| SP5 | TI1>CA8 | Start-p-Max | Startet den max. Gegendruck |
| TI1 | | Timer | Uhr |
| TI2 | | Timer | Uhr |
| | | | |

Tabelle 4: Funktion der Knoten

Die Bedeutung der Formelzeichen und Formeln ist am Beispiel des Knotens CA14 dargestellt.

Das Aussehen des dazugehörigen Dialogfensters zeigt Bild 20.

Beispiel CA14: $1xCA2*1xSP1$ $(a*X) * (b*Y)$ $a=1, b=1, X=CA2, Y=SP1$

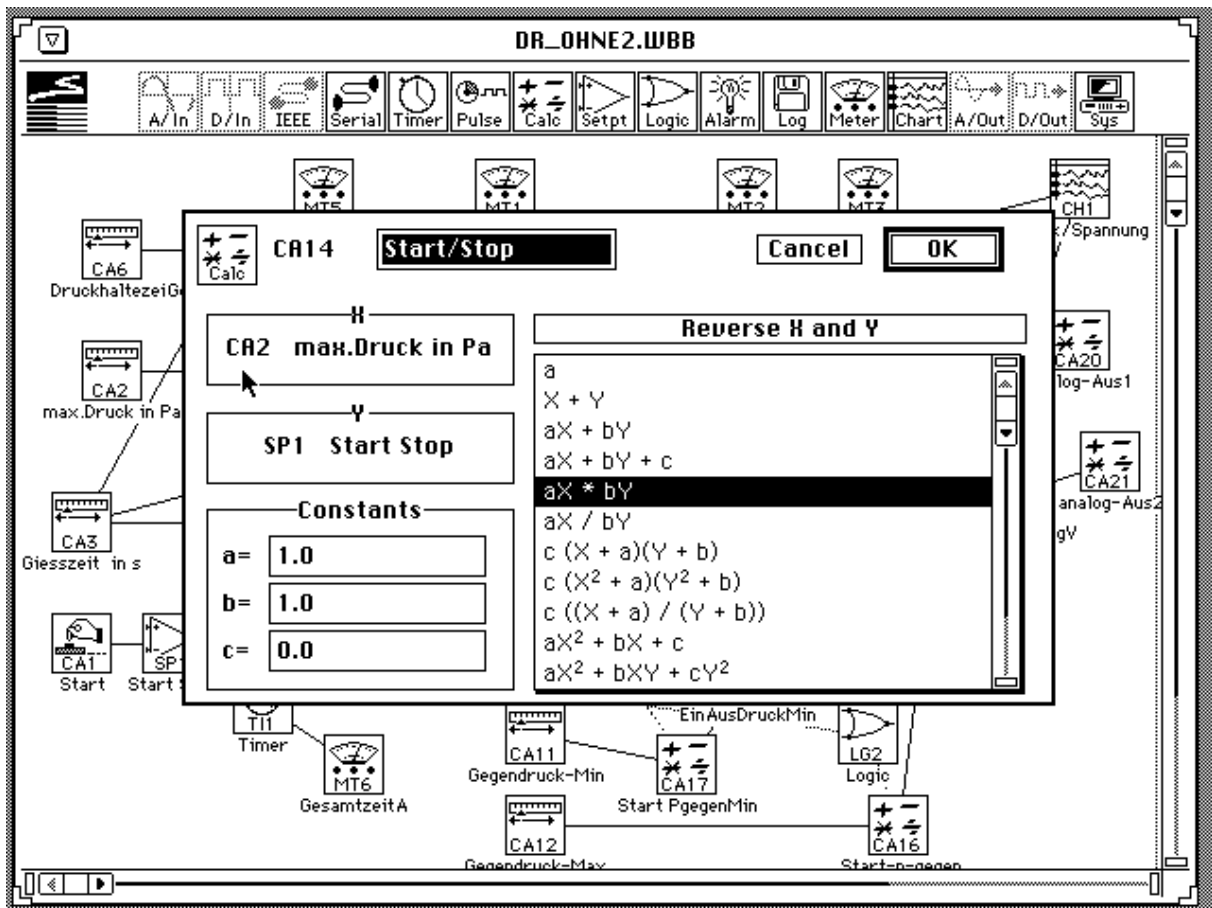


Bild 20: Screenshot des Dialogfensters CA14

Wie in Bild 20 ersichtlich, gibt es im Dialogfenster der Kalkulationen andere einstellbare mathematische Funktionen. Mit deren Hilfe lassen sich weitere Funktionen für den Druckanstieg programmieren.

4.5. Stand der Entwicklung (Sicherheitshinweise)

Die Niederdruckgießanlage darf nur von Personen betrieben werden, die dem letzten Stand der Entwicklung entsprechend, eingewiesen wurden. Von der Anlage können Gefahren ausgehen, wenn sie von unbefugten Personen unsachgemäß eingesetzt wird.

Die Anlage kann mit verschiedenen Gießdrücken betrieben werden, sie ist jedoch nur für einen Druck von maximal 0,099 MPa ausgelegt. Generell ist beim Einstellen eines Gießdruckes zu beachten:

1. Gießdrücke größer 0,099 MPa sind grundsätzlich unzulässig.
2. Der Gießdruck darf im normalen Gießbetrieb 0,05 MPa nicht überschreiten.
3. Gießdrücke zwischen 0,05 und 0,1 MPa dürfen nur nach Absprache eingestellt werden.

Die Anlage kann mit einer Temperatur bis maximal 1200 °C betrieben werden. Das Einstellen von Temperaturen über 1200 °C ist unzulässig und kann zur Zerstörung der Anlage führen. Die Oberflächen des Druckbehälters und des Deckels erwärmen sich während des Betriebes auf ca. 180 °C. Diese Temperaturen sind im Umgang mit der Niederdruckgießanlage zu beachten.

Das ordnungsgemäße Aufsetzen der Form auf die Niederdruckgießanlage ist vor jedem Abguß zu kontrollieren. Während des Gießvorganges dürfen sich keine Personen in unmittelbarer Nähe der Anlage befinden.

Die Bestandteile des Druckbehälters und die Art der Formbefestigung sind in Bild 21 und 22 ersichtlich.

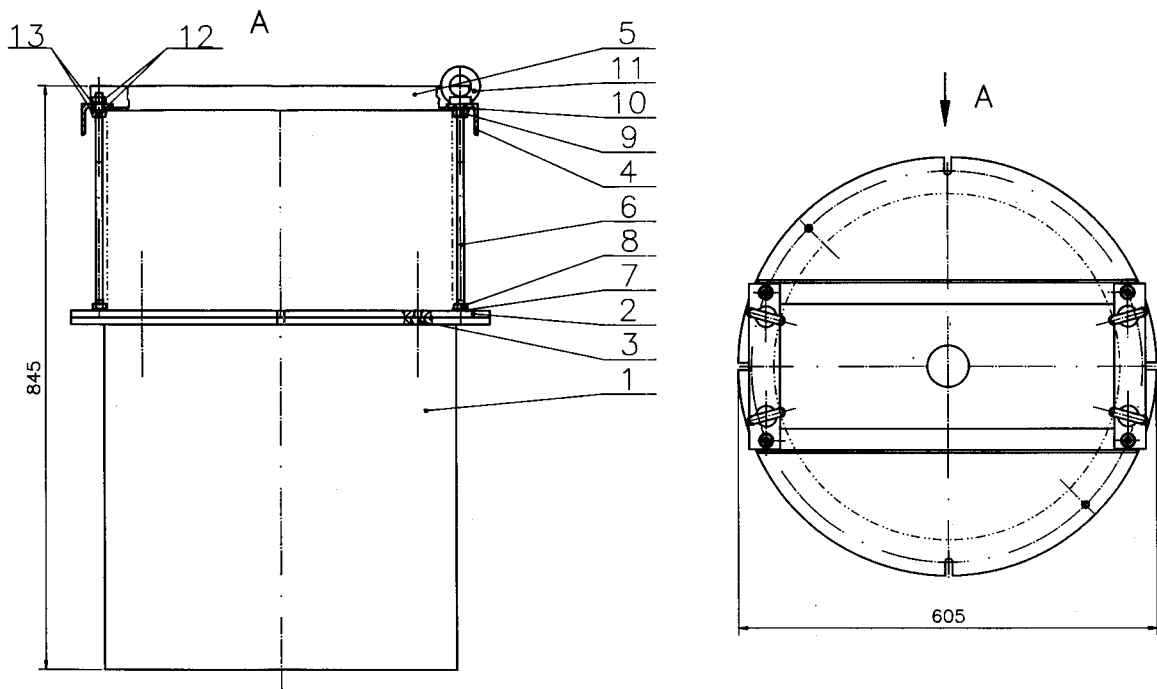


Bild 21: Bestandteile des Druckbehälters

| | | | | |
|----|---|--------------------|---------------|--|
| 13 | 8 | Scheibe | 10,5 DIN 125 | |
| 12 | 8 | Sechskantmutter | M10 DIN 934 | |
| 11 | 4 | Ringschraube | M12 DIN 580 | |
| 10 | 4 | Scheibe | 13 DIN 125 | |
| 9 | 4 | Sechskantmutter | M12 DIN 934 | |
| 8 | 4 | Sechskantmutter | M10 DIN 934 | |
| 7 | 4 | Scheibe | 10,5 DIN 125 | |
| 6 | 4 | Befestigungsstange | 001.96.01.004 | |
| 5 | 2 | Befestigungswinkel | 001.96.01.005 | |
| 4 | 2 | Querwinkel | 001.96.01.006 | |
| 3 | 2 | Zentrierbolzen | 001.96.01.003 | |
| 2 | 1 | Deckel | 001.96.01.002 | |
| 1 | 1 | Druckbehälter | 001.96.01.001 | |

Bild 22: Bezeichnung der Bestandteile

Die Abmessungen des Druckbehälters können Bild 23 entnommen werden.

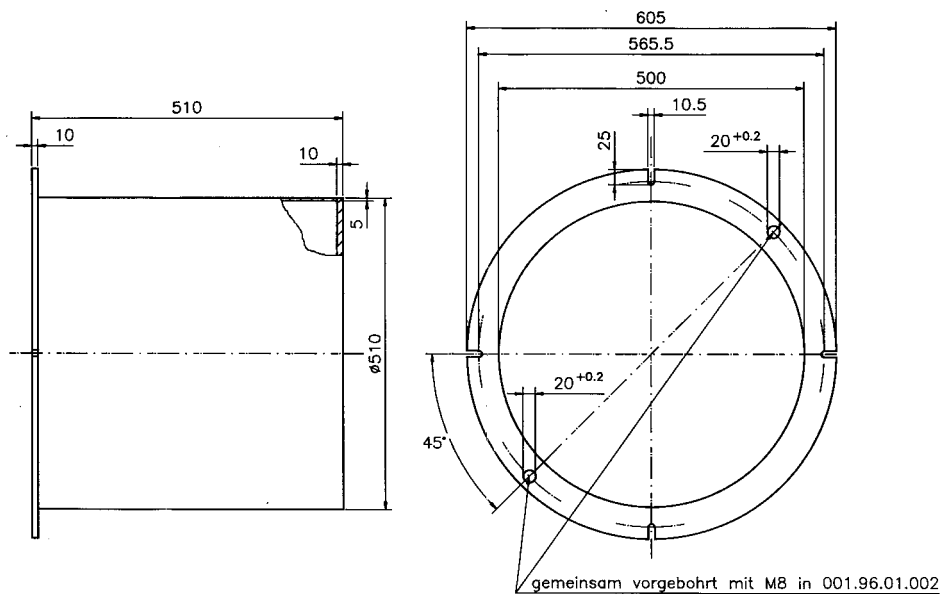


Bild 23: Abmessungen des Druckbehälters

In den Druckbehälter ist eine Isolierung aus Keramikfaser als Hinterisolierung mit einer Dicke von 100 mm eingebracht. Die Keramikfaser ist temperaturbeständig bis 1430 °C. Als Vorderisolierung sind Formsteine aus feuerfestem Beton mit einer Dicke von 50 mm verwendet worden. Die Formsteine sind temperaturbeständig bis 1550 °C. Sie dienen gleichzeitig der Aufnahme der Heizung der Laborgießanlage. In die Anlage kann ein Tiegel mit einem Fassungsvermögen von 15 kg Eisen eingesetzt werden. Der Druckbehälter wird mit einem Deckel (Bild 24) verschlossen, der mit 4 Schrauben M10 verschraubt wird.

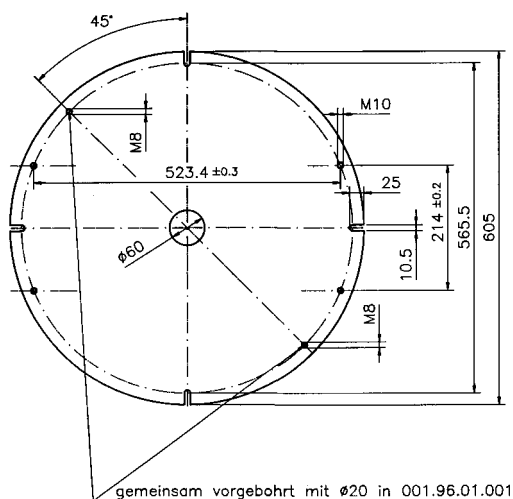


Bild 24: Abmessung des Deckel

Durch die Bohrung in der Mitte des Deckels wird das Steigrohr geführt. Dieses kann einschließlich einer Isolierung einen maximalen Durchmesser von 60 mm haben.

5. Konstruktion einer Niederdruck-Gießeinrichtung für Eisen-Kohlenstoff-Legierungen für den betrieblichen Einsatz

5.1. Vorgaben

Die Anwendung der Niederdruck-Gießanlage soll in einem Produktionsbetrieb erfolgen. Es ergeben sich einschränkende Forderungen, die durch die Firma aufgestellt werden. Aus den durchzuführenden Untersuchungen zur gesteuerten Formfüllung ergeben sich weitere Bedingungen für die Entwicklung und Konstruktion der Niederdruckgießanlage.

Für die Konstruktion ist von einem Tandem-Induktionsofen, der druckdicht ausgeführt ist, mit einem Fassungsvermögen von je 150 kg auszugehen. Der Verschluß des Induktionsofens ist zu realisieren. Die Anschlußmaße ergeben sich aus den Zeichnungen.

Die Druckluftsteuerung soll gekauft werden. Es können dabei solche Steuerungen verwendet werden, wie sie bei den handelsüblichen Aluminium-Niederdruckgießanlagen angewandt werden. Gegebenenfalls kann eine Steuerung verwendet werden, wie sie bei der Laborgießanlage eingesetzt wurde. In jedem Fall soll sie mindestens diesen Funktionsumfang haben.

Die Gießanlage ist für Eisen-Kohlenstoff-Legierungen, speziell für Stahl und hochlegiertes Gußeisen, auszulegen. Es sollen dabei auch niedriggekohlte, hochlegierte Stähle berücksichtigt werden.

Der maximale Druck, der für die Niederdruckanlage zulässig ist, wird auf 0,1 MPa begrenzt. In der ersten Phase der Entwicklung soll auf teure hydraulische oder pneumatische Verriegelungen und andere kostentreibende Faktoren verzichtet werden. Im Ergebnis dieser Forderung ist der Deckel zu verschrauben.

5.2. Konzeption der Niederdruck-Gießeinrichtung

Die Anschlußmaße ergeben sich aus der Konstruktion des Tandem-Induktionsofens nach Bild 25 und bestimmen wesentlich den weiteren Ofenaufbau. Ein weiterer Punkt, der den Ofenaufbau bestimmt, ist der Fakt, daß ein maximaler Druck von 0,1 MPa zulässig ist. Somit

ist ein niedriger Ofenaufbau anzustreben, um eine möglichst große Steighöhe zu gewährleisten bzw. einen möglichst großen Überdruck zu sichern.

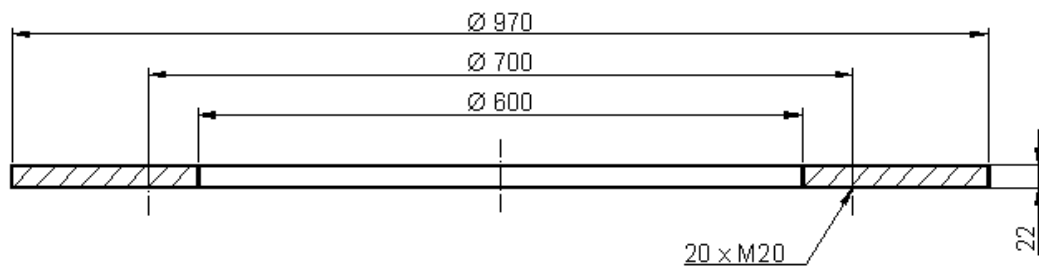


Bild 25: Anschlußmaße des Ofen

Der Druckluftanschluß soll fest installiert werden, dadurch entfallen aufwendige Maßnahmen zur flexiblen Anschlußgestaltung. Dies geschieht durch einen Flansch, der auf den Ofen aufgesetzt wird. Es ergibt sich dadurch eine etwas höhere Bauweise. In Bild 26 und Bild 27 ist das Konzept des Ofenaufbaus dargestellt.

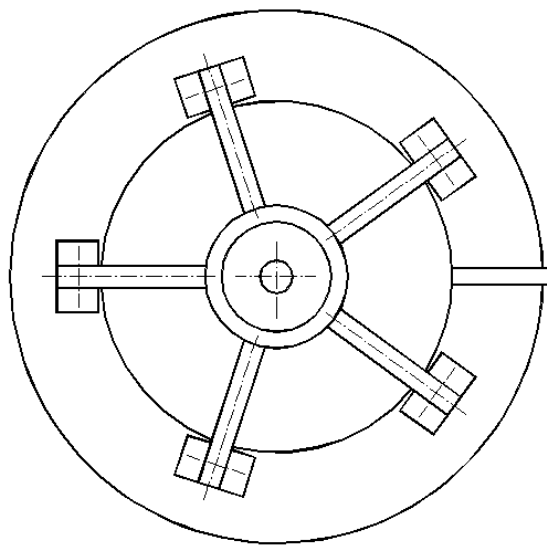


Bild 26: Konzept des Ofendeckels (Draufsicht)

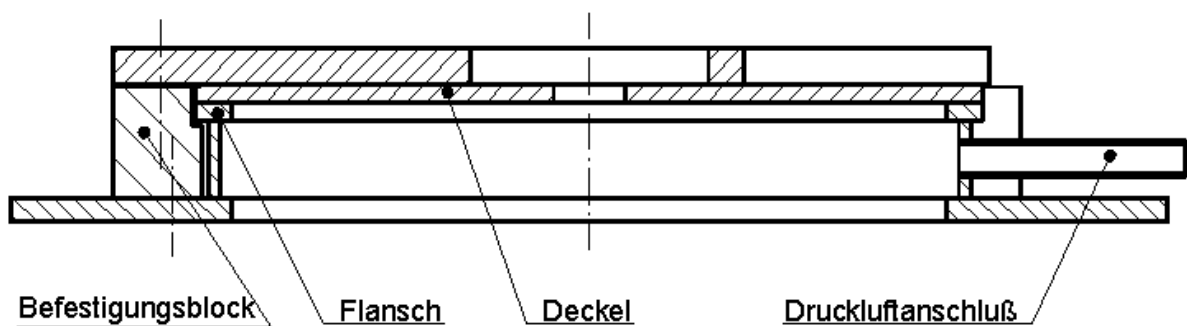


Bild 27: Konzept des Ofendeckels (Vorderansicht geschnitten)

5.3. Verschuß des Ofens

5.3.1. Flansch

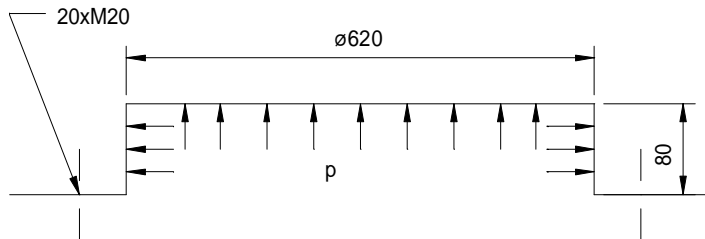


Bild 28: Skizze der am Flansch wirkenden Kräfte

- erforderliche Wanddicke des Rohrstückes des Flanschs (nach DIN 2413)

Geltungsbereich II (ruhend; über 120 °C)

$$d_a/d_i = 1,045 \leq 1,67$$

$$d_a = 640 \text{ mm}$$

$$d_i = 620 \text{ mm}$$

$$s_v = \frac{d_a}{\frac{2 \cdot \sigma_{zul} \cdot v_n}{p} + 1} \quad \text{G.27}$$

$$\sigma_{zul} = K/S \quad \text{G.28}$$

$K = 140 \text{ N/mm}^2$ (0,2 % - Dehngrenze St37 bei 300 °C nach DIN 1629)

$$\sigma_{zul} = 82,353 \text{ N/mm}^2$$

$S = 1,7$ (ohne Abnahmeprüfzeugnis DIN 50049)

$$s_v = 0,388 \text{ mm}$$

$$p = 0,1 \text{ MPa}$$

max. zul. Druck

$$s = s_v + c_{1Z} + c_{2Z} \quad \text{G.29}$$

$$c_{1Z} = 1 \text{ mm}$$

$$c_{2Z} = 1 \text{ mm}$$

$$\underline{s = 2,388 \text{ mm}}$$

Die erforderliche Wandstärke beträgt 2,388 mm. Die vorhandene Wandstärke ist mit 10 mm sehr viel größer als die erforderliche, ein Festigkeitsnachweis entfällt.

- Schraubenquerschnitt zur Befestigung des Flansches

Aus der Vorgabe des Induktionsofen ergibt sich die Anzahl der zu verwendenden Schrauben mit 20 Stück und ihre Größe mit M20. Es wird die Festigkeitsklasse 8.8 gewählt. Die Dichtung des Flansches erfolgt direkt unter dem Rohr. Eine wesentliche Erhöhung der Temperatur wird im Bereich der Schrauben nicht erwartet.

$$F = p_{\max} \cdot A_{\text{Deckel}} \quad \text{G.30} \quad \begin{aligned} A_{\text{Deckel}} &= \pi/4 \cdot d_i^2 \\ A_{\text{Deckel}} &= \pi/4 \cdot 620^2 \\ A_{\text{Deckel}} &= 301907 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$F = 0,1 \cdot 301907 \\ F = 30190 \text{ N}$$

$$F_B = F/20 \quad \text{G.31} \\ F_B = 30190/20 \\ F_B = 1509 \text{ N}$$

$$A_S = (V \cdot F_B \cdot S) / \sigma_{0,2} \quad \text{G.32} \quad \begin{aligned} V &= 3 \\ S &= 2 \\ \sigma_{0,2} &= 640 \text{ MPa} \end{aligned} \\ A_S = (3 \cdot 1509 \cdot 2) / 640 \\ A_S = 14,15 \text{ mm}^2$$

Der erforderliche Spannungsquerschnitt entspricht einer Schraube M5. Die vorhandene Schraubengröße ist durch die Anschlußmaße des Induktionsofens vorgegeben und beträgt M20. Damit werden die erforderlichen Sicherheitsvorgaben erfüllt.

5.3.2. Deckel

Die Druckwirkung ist aus Bild 28 ersichtlich. Der Deckel wird mit 5 Schrauben am Flansch befestigt. Die Hauptbelastung liegt auf diesen 5 Schrauben. Es kann nicht ausgeschlossen werden, daß eine erhebliche Erwärmung der Schrauben erfolgt. Diese Erwärmung kann bis zu 300 °C betragen und ist somit bei der Auslegung der Schrauben zu berücksichtigen.

- Schraubenverbindung am Deckel

gegeben:

$$d_{\text{Deckel}} = 615 \text{ mm}$$

$$p_{\text{max}} = 0,1 \text{ MPa}$$

$$T = 20\text{-}500 \text{ }^\circ\text{C}$$

Es sollen 5 Schrauben verwendet werden.

a) Dimensionierung

$$F = p_{\text{max}} * A_{\text{Deckel}}$$

$$A_{\text{Deckel}} = \pi/4 * d_{\text{Deckel}}^2$$

$$A_{\text{Deckel}} = \pi/4 * 615^2$$

$$A_{\text{Deckel}} = 297057 \text{ mm}^2$$

$$F = 0,1 * 297057$$

$$F = 29706 \text{ N}$$

$$F_B = F/5$$

$$F_B = 29706/5$$

$$F_B = 5941 \text{ N}$$

$$A_S = (V * F_B * S) / \sigma_{0,2}$$

G.33

V=3

Vorspannverhältnis

S=2

Sicherheit

| Werkstoff | $\sigma_{0,2}$ [MPa] | $\sigma_{0,2}$ [MPa] | A_S [mm ²] | | A_S [mm ²] | |
|---------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-----|--------------------------|-----|
| | T=20°C | T=500°C | T=20°C | | T=500°C | |
| 25 CrMo 4 | 450 | 240 | 79,2 | M12 | 148,5 | M16 |
| 24 CrMoV 5.5 | 550 | 350 | 64,8 | M12 | 101,8 | M14 |
| 21 CrMov 5.11 | 550 | 380 | 64,8 | M12 | 93,8 | M14 |

gewählt:

5 Schrauben M16x70-24 CrMoV 5.5

b) vorhandene Sicherheiten

gegeben:

$$F_B = 5941 \text{ N}$$

$$\text{Schraube M16 24 CrMoV 5.5} \quad A_S = 157 \text{ mm}^2$$

$$T = 20\text{-}500 \text{ }^\circ\text{C}$$

gesucht:

Sicherheit gegen Streckgrenze

Sicherheit gegen Dauerbruch

1) Kräfte und Momente

$$1/C_S = 1/E \cdot (l_1/A_{S1} + l_2/A_{S2}) \quad \text{G.34}$$

$$l_1 = 46 + 1,7d = 46 + 1,7 \cdot 16 = 73,2 \text{ mm}$$

$$l_2 = 12,5 \text{ mm}$$

$$A_{S1} = \pi/4 \cdot d^2 = \pi/4 \cdot 16^2 = 201,06 \text{ mm}^2$$

$$A_{S2} = 157 \text{ mm}^2$$

$$E = 210000 \text{ MPa (T=20 }^\circ\text{C)}$$

$$E = 165000 \text{ MPa (T=500 }^\circ\text{C)}$$

$$1/C_S = 1/210000 \cdot (73,2/201,06 + 12,5/157) = 2,11 \cdot 10^{-6} \text{ mm/N}$$

$$C_S = 4,73 \cdot 10^5 \text{ N/mm (T=20 }^\circ\text{C)}$$

$$C_S = 3,72 \cdot 10^5 \text{ N/mm (T=500 }^\circ\text{C)}$$

$$C_P = (A_P \cdot E_P) / l_P \quad \text{G.35}$$

$$A_P = \pi/4 \cdot (d_a^2 - d_i^2) = \pi/4 \cdot (40^2 - 17,5^2) = 1016,11 \text{ mm}^2$$

$$l_P = 50 \text{ mm}$$

$$C_P = (1016,11 \cdot 210000) / 50$$

$$C_P = 42,68 \cdot 10^5 \text{ N/mm (T=20 }^\circ\text{C)}$$

$$C_P = 33,53 \cdot 10^5 \text{ N/mm (T=500 }^\circ\text{C)}$$

$$F_V = 3 \cdot F_B = 3 \cdot 5941 = 17823 \text{ N} \quad \text{G.36}$$

$$F_{SZ} = F_B \cdot (C_S / (C_S + C_P)) = 592,72 \text{ N} \quad \text{G.37 (T=20 }^\circ\text{C)}$$

$$F_{SZ} = F_B \cdot (C_S / (C_S + C_P)) = 593,30 \text{ N} \quad \text{(T=500 }^\circ\text{C)}$$

$$F_{Smax} = F_V + F_{SZ} = 18415,72 \text{ N} \quad \text{G.38 (T=20 }^\circ\text{C)}$$

$$F_{Smax} = F_V + F_{SZ} = 18416,30 \text{ N} \quad \text{(T=500 }^\circ\text{C)}$$

$$F_{Sa} = 0,5 \cdot F_{SZ} = 296,36 \text{ N} \quad \text{G.39 (T=20 }^\circ\text{C)}$$

$$F_{Sa} = 0,5 \cdot F_{SZ} = 296,65 \text{ N} \quad \text{(T=500 }^\circ\text{C)}$$

$$M_G = F_V \cdot d_2 / 2 \cdot (\tan(\alpha + \rho')) \quad \text{G.40}$$

$$d_2 = 14,7 \text{ mm}$$

$$P_G = 2 \text{ mm}$$

$$\tan \alpha = P_G / (\pi \cdot d_2) = 2 / (\pi \cdot 14,7) = 0,0433 \quad \text{G.41}$$

$$\tan \rho' = \mu' = 0,12 \text{ (angenommen)}$$

$$M_G = 17823 \cdot 14,7 / 2 \cdot (0,0433 + 0,12)$$

$$M_G = 21392 \text{ Nmm}$$

2) Spannungen

$$\tau_t = M_G / W_t \quad \text{G.42}$$

$$W_t = \pi / 16 \cdot d_3^3 \quad d_3 = 13,546 \text{ mm} \quad \text{G.43}$$

$$W_t = \pi / 16 \cdot 13,546^3 = 488 \text{ mm}^3$$

$$\tau_t = 21392 / 488 = 43,83 \text{ MPa}$$

$$\sigma_Z = F_{S_{\max}} / A_S = 18415,72 / 157 = 117,30 \text{ MPa} \quad (T=20 \text{ }^\circ\text{C}) \quad \text{G.44}$$

$$\sigma_Z = F_{S_{\max}} / A_S = 18416,30 / 157 = 117,30 \text{ MPa} \quad (T=500 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_Z^2 + 3 \cdot \tau_t^2}$$

$$\sigma_v = \sqrt{(117,30)^2 + 3 \cdot (43,83)^2} \quad \text{G.45}$$

$$\sigma_v = 139,71 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = F_{S_a} / A_S = 296,65 / 157 = 1,89 \text{ MPa} \quad \text{G.46}$$

3) Sicherheit gegen Streckgrenze

$$S_{0,2} = \sigma_{0,2} / \sigma_v \quad \text{G.47}$$

$$S_{0,2} = 550 / 139,71 = 3,9 \quad (T=20 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$S_{0,2} = 350 / 139,71 = 2,5 \quad (T=500 \text{ }^\circ\text{C})$$

4) Sicherheit gegen Dauerbruch

$$S_D = \sigma_{ADK} / \sigma_a = 40 / 1,89 = 21,2 \quad \text{G.48}$$

5.3.3. Kokillenthalterung

Der auf die Kokillenthalterung wirkende Druck von maximal 0,1 MPa wirkt über den Steigrohrkragen auf einer Fläche von maximal

$$A = \pi/4 \cdot (d_a - d_i)^2 \quad \text{G.49}$$

$$d_a = 70 \text{ mm}$$

$$d_i = 30 \text{ mm (mindestens)}$$

$$A = \pi/4 \cdot (70 - 30)^2$$

$$A = 1256 \text{ mm}^2$$

$$F = p \cdot A$$

$$F = 0,1 \cdot 1256$$

$$F = 125,6 \text{ N}$$

Dieser Kraft wirkt die Gewichtskraft der Kokillenthalterung und der Kokille entgegen. Die hier auftretenden Kräfte sind minimal.

5.4. Steigrohr

5.4.1. Steigrohrmaterial

5.4.1.1. Versuchsdurchführung

Das Steigrohr ist beim Niederdruck-Gießverfahren sehr hohen Belastungen ausgesetzt. Es taucht dabei in die Schmelze ein. Es muß die Temperaturen der Schmelze ertragen, chemisch gegen diese beständig sein und auch den entsprechenden Temperaturunterschied zwischen Schmelze und Ofenraum aushalten. Weiter wird die Schmelze durch das Steigrohr aufwärts in die Form gefördert. Auch dieser Belastung muß das Steigrohr standhalten. Ein Material kann als geeignet definiert werden, wenn es diesen Belastungen in einem bestimmten Zeitraum widersteht. Der Zeitraum muß mindestens so groß sein, daß ein Abguß erfolgen kann. Eine lange Standzeit des Steigrohres sollte angestrebt werden. Das bedeutet, daß das Steigrohr über einen längeren Zeitraum in der Schmelze verbleiben muß und dadurch weitere Anforderungen an das Steigrohrmaterial gestellt werden. Eine Abschätzung, welche Variante die bessere ist, wird vom Verhältnis Aufwand und Nutzen, der Wirtschaftlichkeit, bestimmt.

Um die Eignung der verschiedenen Steigrohrmaterialien zu testen, wurden Rohre aus diesen Materialien in eine Eisenschmelze bei 1400 - 1550 °C getaucht. Diese Eisenschmelze sollte sowohl den Bereich des Gußeisens als auch den des Stahls berücksichtigen. Die Versuche wurden mit den Werkstoffen GG15 und GS-60 durchgeführt. Auf Versuche mit niedrig gekohlten Stahl oder reinem Eisen wurde verzichtet. Die Versuche wurden in einem offenen Induktions-Tiegelofen durchgeführt. Die Rohre aus den verschiedenen Versuchsmaterialien wurden durch Halten über der Schmelze vorgewärmt. Diese Vorwärm- und Trockenphase dauerte je Versuch ca. 10 Minuten. Die Rohre wurden zu Beginn der Vorwärmphase ca. 10 cm über der Schmelzeoberfläche gehalten und dabei gedreht, um eine gleichmäßige Erwärmung zu erreichen. Innerhalb der angegebenen Vorwärmphase wurden die Rohre allmählich bis auf wenige Millimeter über die Schmelzeoberfläche geführt. Danach begann der eigentliche Tauchversuch. Die Rohre wurden langsam ca. 5 cm tief in die Schmelze eingetaucht. In der Schmelze wurden sie für ca. 60 s belassen. Damit wurde die prinzipielle Eignung des jeweiligen Steigrohrmaterials nachgewiesen. Für Materialien, die sich bei diesen Versuchen als geeignet erwiesen, wurden Versuche über einen Zeitraum von mehreren Minuten durchgeführt.

5.4.1.2. **Keramikrohre**

Zu Beginn wurde mit einfachen Mitteln nach Materialien gesucht, die für das Niederdruck-Gießverfahren geeignet sind. So wurden die ersten Versuche mit Keramikrohren aus Beständen der ehemaligen DDR durchgeführt. Diese erwiesen sich sehr schnell als ungeeignet. Beim Eintauchen in die flüssige Eisenschmelze zersprangen sie an der Eintauchstelle in kleine Bruchstücke. Die chemische Zusammensetzung dieser Rohre war ebenfalls unbekannt. Auf Grund der schlechten Eignung wurde darauf verzichtet, genauere Angaben einzuholen.

Im weiteren Verlauf wurden einige Hochleistungskeramiken getestet. In Bild 29 und Bild 30 sind zwei Rohre aus Hochleistungskeramik nach dem Tauchversuch abgebildet. Sowohl das SiC-Rohr als auch das AlN-Rohr halten der thermischen Belastung an der Schmelzebadoberfläche nicht stand. Beim Eintauchen der Rohre platzen größere Bruchstücke ab.



Bild 29: SiC-Rohr nach dem Tauchversuch



Bild 30: AlN-Rohr nach dem Tauchversuch

Die Hochleistungskeramik SN 400 Z [53] (ohne Abbildung), von der ein Probestück vorlag, besitzt die notwendige Temperaturwechselfestigkeit. Im Versuch konnten keine Risse nachgewiesen werden. Ob ein Rohr aus diesem Material ebenfalls die geforderten Eigenschaften erreicht, wurde nicht ermittelt.

Insgesamt ist festzustellen, daß Rohre aus Keramik die Anforderungen in Bezug auf die Temperaturwechselfestigkeit nicht erfüllen. Keramikrohre sind auch auf Grund ihrer Kosten ungeeignet.

5.4.1.3. Keramikfaserrohre

Keramikfaserrohre (Bild 31) zeichnen sich durch ihre Thermoschockbeständigkeit aus. Die getesteten Rohre [49] haben den Tauchversuch in Gußeisen bei 1400 °C gut bestanden. Bei Stahl und einer Temperatur von 1550 °C erfolgte eine heftige Reaktion mit der Schmelze. Die Versuche wurde daraufhin abgebrochen. Der Bereich des Rohres, der sich in der Schmelze befand, hat dabei seine Form verloren. Die Fasern waren aneinander gesintert. Keramikfaserrohre in einer anderen Materialzusammensetzung lagen für diesen Temperaturbereich nicht vor. Weiterführende Versuche wurden daraufhin mit dieser Materialgruppe nicht durchgeführt. Die Problematik der Gasdurchlässigkeit dieser Rohre wurde nicht näher untersucht. Bei einer einzelnen Anwendung während des Niederdruckgießens konnte eine Formfüllung erreicht werden. Daraus läßt sich schließen, daß die auftretende Druckdifferenz zwischen dem Rohrinernen und dem Ofenraum groß genug ist, um eine Förderung der Schmelze zu gewährleisten. Im Falle eines Praxiseinsatzes muß gegebenenfalls ein Druckverlust bei der Steuerung berücksichtigt werden.



Bild 31: Keramikfaserrohr

5.4.1.4. Graphitrohre

Das getestete Rohr hat den Tauchversuch bei 1550 °C sehr gut bestanden. Über den betrachteten Zeitraum von 60 s ist ein starker Abbrand zu verzeichnen. Bei dem angewandten Rohr (Bild 32) handelt es sich um ein Rohr, daß normalerweise als Heizstab verwendet wird und einen sehr hohen Kohlenstoffanteil hat. Rohre, die in der Stahlindustrie für den Strangguß verwendet werden, konnten leider nicht getestet werden. Diese Rohre bestehen beispielsweise aus 24 - 28 % Kohlenstoff, 40 - 42 % Al_2O_3 , 24 - 28 % SiO_2 und 3 - 4 % Fe_2O_3 . Der Kohlenstoffanteil ist damit geringer. Diese Rohre haben einen geringeren Abbrand, der bei der Schmelzeführung berücksichtigt werden muß. Der Grund liegt in der längeren Verweildauer des Rohres in der Schmelze auf Grund des Verfahrens. Der Einsatz bei niedrig gekohlten Stählen ist somit aus metallurgischer Sicht fraglich.



Bild 32: Graphitrohr

5.4.1.5. Quarzglasrohre

Der Test von Quarzglasrohren brachte sehr gute Ergebnisse. Sie besitzen die notwendige Temperaturwechselfestigkeit bei Temperaturen bis ca. 1600 °C. Ein Vorwärmen ist dabei nicht notwendig. Innerhalb der Versuchsdauer von 60 s behalten sie ihre äußere Form bei. Das bedeutet, daß sich keine Bestandteile des Rohres während dieses Zeitraumes in der Schmelze lösen. Die Versuche mit Quarzglas wurden mit einer Versuchsdauer von 10 Minuten wiederholt. Dabei zeichnet sich ab, daß das Glas am Ende des Versuchs nicht nur weich wird, sondern auch an der Oberfläche Blasen bildet. Es ist möglich, daß in diesem

Zeitraum geringfügig Bestandteile des Rohres in der Schmelze gelöst werden. Diese Bestandteile sind Silicium und Sauerstoff. Dieselben Versuche wurden mit Quarzglas durchgeführt. Unterschiede zum Quarzglas wurden nicht festgestellt.

5.4.1.6. Bewertung der Rohre

Aus den durchgeführten Versuchen ergibt sich, daß im Wesentlichen nur die Quarzglas-, Quarzglas- und die Graphitrohre für die Anwendung als Steigrohr bei Temperaturen bis 1600 °C geeignet sind. Die getesteten Keramikrohre besitzen nicht die notwendige Temperaturwechselfestigkeit. Sie zerspringen beim Eintauchen in die Schmelze an der Schmelzebadoberfläche in kleine Bruchstücke. Die bei den Versuchen angewandten Keramikfaserrohre sind im Bereich des Gußeisens einsetzbar, wurden aber bei der Anwendung in der Stahlschmelze zerstört. Sowohl die Graphitrohre als auch die Quarzrohre lösen sich auf, wenn sie über einen längeren Zeitraum in der Schmelze verbleiben. Die vorhandenen Graphitrohre können auf Grund der Bedingung, daß auch Stähle mit einem geringen Kohlenstoffgehalt vergossen werden sollen, nicht verwendet werden. Da bereits bei einer Versuchsdauer von 60 s ein sichtbarer Abbrand vorhanden ist, würde die Aufkohlung des Stahles beim Niederdruckgießen mit Gießzeiten von mehreren Minuten zu hoch werden. Quarzglasrohre sind mindestens 10 Minuten beständig gegenüber der Gußeisen- oder der Stahlschmelze. Diese Zeit muß für das Niederdruckgießen ausreichen. Die notwendige Formfüllzeit kann nach Gleichung G.10 durch Variation des Steigrohrdurchmessers und der Geschwindigkeit der Schmelze im Steigrohr beeinflußt werden. Die Geschwindigkeit der Schmelze im Steigrohr wird wiederum nach Gleichung G.8 hauptsächlich durch den Druck im Druckbehälter bestimmt. Die Erstarrung des Gußstücks muß ebenfalls in diesem Zeitraum erfolgen. Der Laborgießofen hat ein Fassungsvermögen von maximal 15 kg Eisen. Die maximale Gußstückmasse beträgt 5 kg. Die für den betrieblichen Einsatz vorgesehenen Induktionsöfen haben ein Fassungsvermögen von maximal 150 kg Eisen. Die hier zur Anwendung kommenden Mengen sind sowohl in der Formfüllung als auch in der Erstarrung in einem Zeitraum von 10 Minuten handhabbar.

5.4.2. Ausführung

Das Steigrohr muß neben den oben erwähnten Eigenschaften die Gießeinrichtung druckdicht abschließen. Das bedeutet, daß in der Durchführung durch den Deckel eine Abdichtung zwischen Steigrohr und Deckel erfolgen muß. Die Verwendung von Quarzglas bietet dabei den Vorteil, das es relativ einfach umgeformt werden kann. So kann ein glattes Rohr in einer Glasbläserei mit einem Kragen versehen werden, der als Dichtfläche am Deckel benutzt werden kann. Dieser Umstand wurde beim Test der Laborgießanlage genutzt. Die Umformung des Rohres ist aber ein zusätzlicher Kostenfaktor. Es wurde für die betriebliche Gießeinrichtung nach einer Lösung gesucht, bei der Quarzglasrohre als Meterware gekauft werden kann.

Das Problem besteht darin, daß das Rohr an seiner Außenwand abgedichtet werden muß. Dabei tritt an dieser Fläche beim Gießen ein Temperaturwechsel von Raumtemperatur auf Schmelztemperatur auf. Bei chemisch gebundenen Formstoffen besteht die Möglichkeit das Rohr in die Form zu integrieren. Der Zusammenhalt der Form mit dem Rohr erfolgt hier über den chemischen Binder. Dies wurde mit Formen aus Wasserglas getestet. Das Ergebnis dieses Versuches zeigt, daß eine Reaktion des Binders mit dem Rohr stattfindet. Durch diese Reaktion sitzt das Rohr fest in der Form. Es sind Temperaturen über 1500 °C möglich.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, daß Rohr in einer Halterung zu klemmen. Dort muß es druckdicht befestigt sein. Die Temperaturen, die an dieser Stelle auftreten, betragen bis zu 1500 °C. Eine solche Dichtung kann mit Keramikfasern entsprechender Qualität erreicht werden. Die Keramikfaser wird zwischen Rohr und Halterung eingeklemmt. Dadurch erfolgt sowohl die thermische Isolation zur Halterung als auch der druckdichte Abschluß durch die Verdichtung der Keramikfaser. Zusätzlich kann zum Schutz der Keramikfaser am oberen Ende des Rohres ein Ring aus Kernkleber gelegt werden. Das Rohr und die Halterung müssen wiederum gegenüber dem Druckbehälter abgedichtet werden. An dieser Stelle sollen die Temperaturen nicht größer als 300 °C werden. Dort können ebenfalls Flachdichtungen aus Keramikfasern eingesetzt werden. Dichtungen aus Elastomeren sind unter Umständen auch möglich.

Die Deckeldurchführung ist eine Zone, in der die Temperatur vor dem Gießen unter der Schmelztemperatur des zu vergießenden Metalls liegt. Es ist aber notwendig, daß in diesem Bereich der Gußwerkstoff bis zum Ende des Gießvorganges flüssig bleibt, um aus dem Steigrohr zurück in die Gießeinrichtung fließen zu können. Aus diesem Grund soll auch hier

eine thermische Isolierung erfolgen. Für diese Isolierung ist ein Keramikfaserrohr geeignet. Bild 33 zeigt den Aufbau der Steigrohrhalterung. Wie daraus ersichtlich wird, kommt in der Konstruktion ein Keramikfaserrohr sowohl für die Dichtung als auch für die Isolierung im Bereich der Deckeldurchführung zur Anwendung.

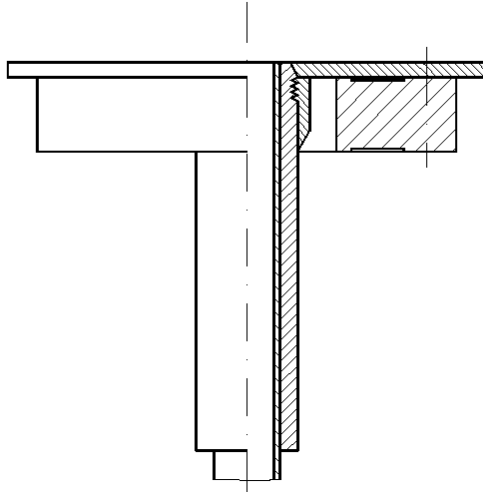


Bild 33: Steigrohrhalterung

Diese Form der Steigrohrhalterung wurde auch bei den Versuchen mit der Laborgießanlage verwendet.

5.5. Konstruktive Zusammenfassung

Die Anlage besteht aus:

- einem 150 kg - Induktionsofen,
- einem Flansch mit Druckluftanschluß,
- einer thermischen Isolierung,
- einem Deckel mit einer variablen Gießformarretierung und
- einem Steigrohr.

Als Druckluftsteuerung kann die Steuerung der Laborgießanlage verwendet werden. Diese besteht aus einem PC, der Software „Workbench“ und einem Druckregelventil (vgl. 4.4.).

Die Bilder 34 und 35 zeigen eine 3D-Darstellung des Ofenaufbaus. Der Bau dieser industriellen Anlage ist bisher nicht erfolgt. Versuche konnten daher auf dieser Anlage nicht durchgeführt werden.

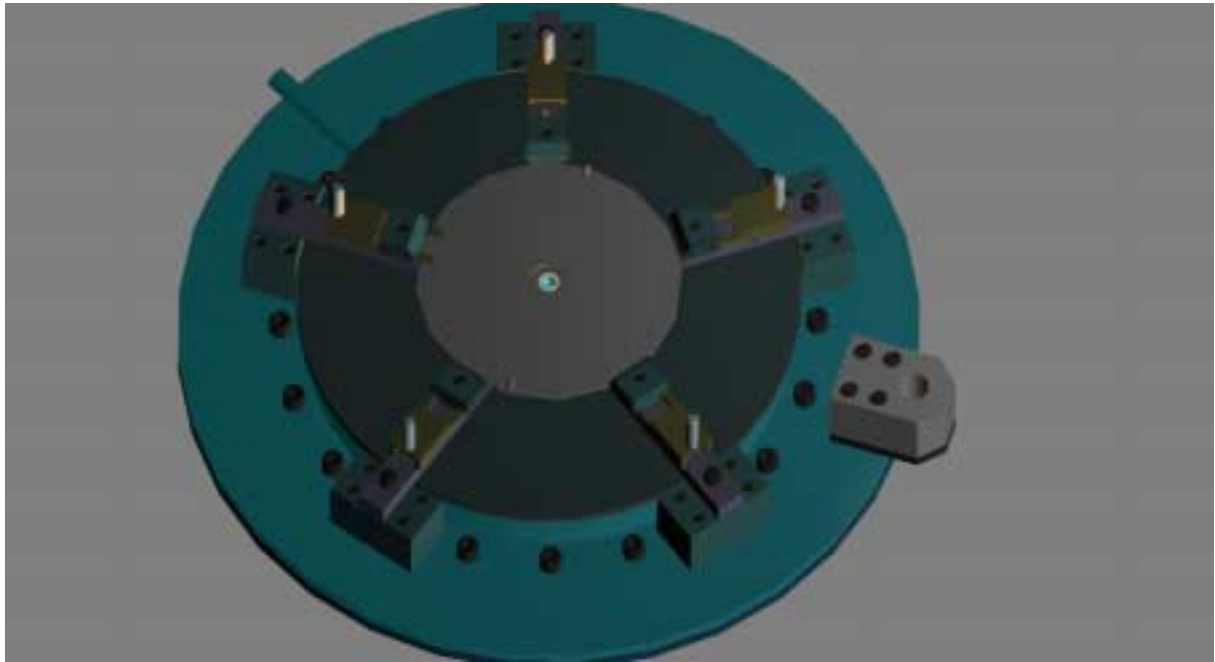


Bild 34: 3D-Ansicht des Ofenaufbaus

Der Ofenaufbau in Bild 35 ist ohne Isolierung des Deckels und des Flansches dargestellt. Die Länge der Keramikfaserisolierung des Steigrohres deutet die Dicke der Deckelisolierung an. Auf dem Steigrohr befindet sich die Spannplatte, auf der die Form befestigt wird. Sie wird beim Aufsetzen durch die Spannblöcke in die richtige Position gebracht und durch Betätigung der Schieber während des Gießens gehalten. Um den Prozeß zu automatisieren, müssen lediglich die Schieber durch pneumatische oder hydraulische Spanner ersetzt werden.

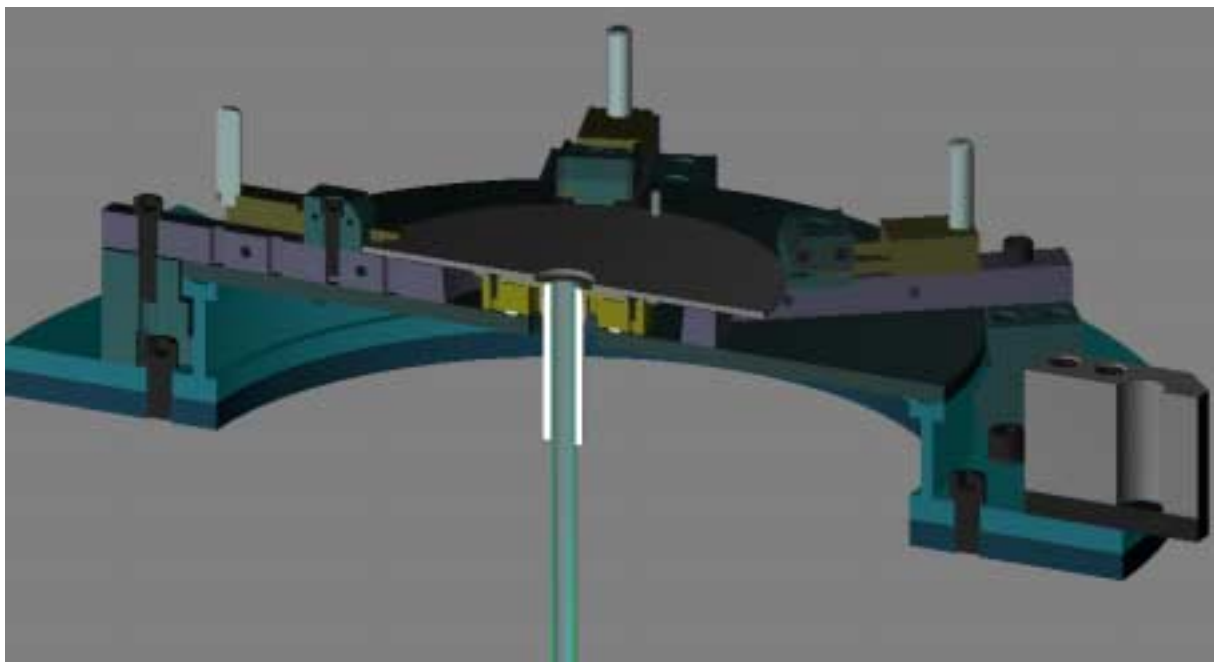


Bild 35: 3D-Schnitt des Ofenaufbaus

6. Experimente

6.1. Niederdruck-Gießverfahren

6.1.1. Erprobung der Laborgießanlage

Es wurden Versuche zur Erprobung der Laborgießanlage durchgeführt. Damit wurde die Eignung des Quarzglas als Steigrohrmaterial nachgewiesen. Außerdem wurde das Zusammenwirken aller Komponenten getestet. Bei diesen Versuchen wurde ein Steigrohr mit Kragen verwendet, das in eine Graphitform eingearbeitet und dort mit Kernkleber abgedichtet wurde. Das Steigrohr hatte einen Innendurchmesser von 13 mm. Die Länge betrug 310 mm. Es wurde nicht vorgeheizt. Die zweite Dichtung erfolgte zwischen der Graphitform und dem Deckel. Die Form wurde vor dem Schließen der Laborgießanlage auf dem Deckel druckdicht befestigt. Die geforderten Temperaturen können mit der installierten Heizung der Laborgießanlage nicht erreicht werden, deshalb war es erforderlich, die Schmelze entsprechend zu überhitzen. Bei dem Versuch wurden 12 kg Gußeisen (GG15) verwendet, das auf 1550 °C erwärmt wurde. Der 15 kg-Tiegel mit der überhitzten Schmelze wurde in die Laborgießanlage eingesetzt. Der Deckel mit der Form wurde aufgesetzt und druckdicht verschlossen. Danach wurde der Gießvorgang ausgelöst. Nach dem Ende des Gießvorganges wurde der Deckel geöffnet und der Tiegel wieder entnommen. Der gesamte Prozeß dauerte ca. 4 Minuten. Der Versuchsaufbau ist in Bild 36 dargestellt.

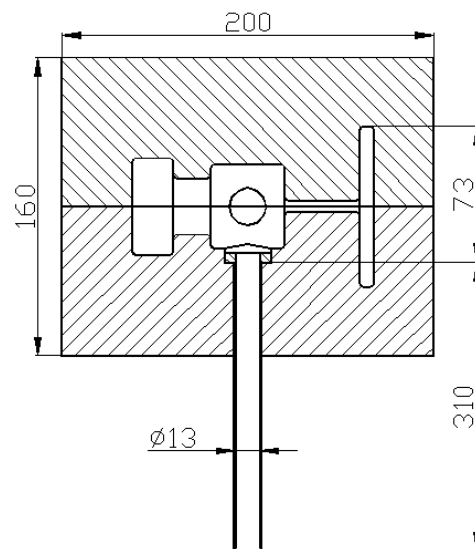


Bild 36: Versuchsaufbau für die Erprobung der Laborgießanlage

Das Steigrohr tauchte ca. 100 mm in die Schmelze ein. Damit ergibt sich eine erforderliche Steighöhe der Schmelze von $h = 310 - 100 + 73 = 283$ mm. Nach Gleichung G.9 ist für GG15 mit einer Dichte von 6900 kg/m^3 zum Erreichen dieser Steighöhe ein Druck von 0,019 MPa notwendig. Es wurde ein Enddruck von 0,035 MPa und eine Gießzeit von 5 s eingestellt. Damit beträgt die Gießgeschwindigkeit 0,1 m/s. Der Druck wurde 40 s aufrecht erhalten.

Als Ergebnis dieses Tests kann festgestellt werden, daß die Form vollständig gefüllt wurde. Die Laborgießanlage ist folglich für das Niederdruckgießen von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen geeignet. Beim Gießen sind in Bezug auf die Temperaturen Abstriche zu machen. Das heißt, die Schmelze muß überhitzt werden.

6.1.2. Versuche mit Eisen-Kohlenstoff-Legierungen

6.1.2.1. Versuche mit Stahl

Die bei der Erprobung der Laborgießanlage gewonnenen Erkenntnisse wurden für das Gießen von Stahl genutzt. Diese Versuche dienten ebenfalls der Erprobung des Verfahrens. Auf Grund der begrenzten maximalen Temperatur der Heizung von $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ wurden dazu drei Versuche durchgeführt. Diese Versuche sind als Stichversuche zu bewerten. Die praxisnahe Erprobung des Niederdruck-Stahlgusses muß auf einer Anlage durchgeführt werden, die das Halten der Gießtemperatur auf $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ ermöglicht.

Für die Versuche mit der Laborgießanlage wurde ein GS-46 Si 4 verwendet. Die erforderlichen Gießtemperaturen liegen über $1500 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Schmelze wurde auf $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ erwärmt. Das Schließen der Laborgießanlage mußte sehr schnell erfolgen, damit der Temperaturverlust während der Vorbereitung zum Gießen klein gehalten werden konnte. Das Steigrohr wurde aus Quarzglas hergestellt. Als Ergebnis war zu verzeichnen, daß die Form in einem Versuch erfolgreich gefüllt werden konnte. In zwei Fällen erstarrte die Schmelze im Steigrohr in unterschiedlichen Höhen. Es liegt die Vermutung nahe, daß mit der Versuchsanlage die für den Stahlguß erforderlichen Temperaturen nicht reproduzierbar gehalten werden können und der Stahl nicht ausreichend überhitzt wurde. Insgesamt ist festzustellen, daß das Verfahren auch für den Stahlguß geeignet ist. Die erforderlichen Temperaturen müssen aber eingehalten werden. Das Steigrohr hat aber auch diesen hohen thermischen und mechanischen Beanspruchungen stand gehalten. Im Verlauf der Arbeit wurde unter den gegebenen Bedingungen auf weitere Versuche mit Stahl verzichtet. Alternativ wurde ein hochlegiertes Gußeisen G - X 300 CrMo 15 3 verwendet.

6.1.2.2. Versuche mit legiertem Gußeisen

Ausgehend von der Tatsache, daß die Schmelze bei den Versuchen mit Stahl in unterschiedlichen Höhen im Steigrohr und im Gußstück erstarrt war, mußten die in den verschiedenen Bereichen des Steigrohres und des Gußstückes auftretenden Temperaturen überprüft werden. Des weiteren war zu kontrollieren, ob durch das Niederdruck-Gießverfahren eine Speisung des Gußstückes durch das Steigrohr erfolgen kann. Als Gußmaterial wurde ein G-X 300 CrMo 15 3 verwendet. Die Gießtemperatur betrug bei allen Versuchen 1500 °C. Der maximale Druck wurde auf 0,03 MPa und die Druckhaltezeit auf 70 s festgelegt. Das Steigrohr bestand aus Quarzglas, dessen Durchmesser variiert wurde. Die Form wurde aus Wasserglas hergestellt, in der das Steigrohr integriert war. Als Gußstück kam ein einfacher Zylinder zum Einsatz. Der Durchmesser des Steigrohres wurde in den Abmessungen $d = 21, 23$ und 30 mm variiert. Die Maße und die Anordnung der Meßpunkte sind Bild 37 zu entnehmen.

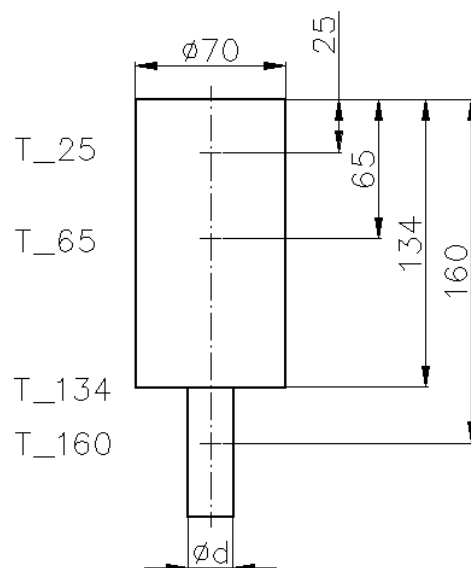


Bild 37: Maße und Meßanordnung beim Versuch GX.01.

Die Zusammenfassung der einzelnen Versuchsergebnisse in Bild 38 zeigt, daß unter den gegebenen Bedingungen eine Speisung durch das Steigrohr nicht möglich ist. Dies wird dadurch deutlich, daß zuerst die Temperatur T_{160} (im Steigrohr) unter die Liquidustemperatur sinkt, während die Temperaturen T_{134} , T_{65} und T_{25} (im Gußstück) noch oberhalb der Liquidustemperatur liegen. Die Auswirkungen bei einem solchen Versuchsverlauf sind Oberflächenlunker und Gasblasen im oberen Gußteilbereich.

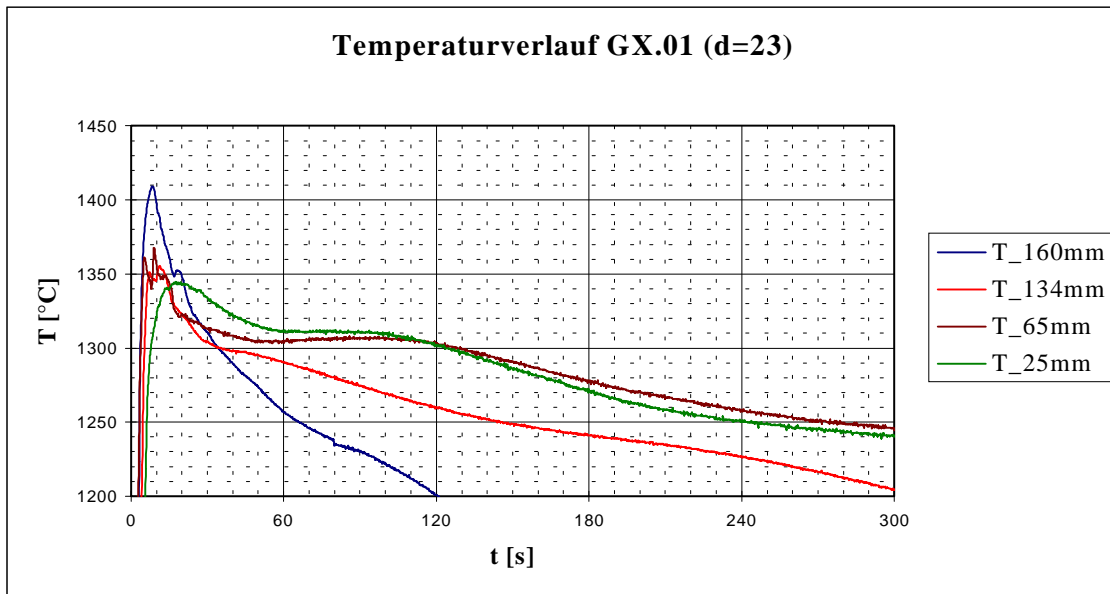


Bild 38: Temperaturverlauf in den Probegußteilen

Ein Vergleich der Temperaturen bei unterschiedlichen Steigrohrdurchmessern an den Meßpunkten T_134 und T_160 in den Bildern 39 und 40 zeigen, daß die Temperaturen bei größeren Steigrohrdurchmessern langsamer absinken.

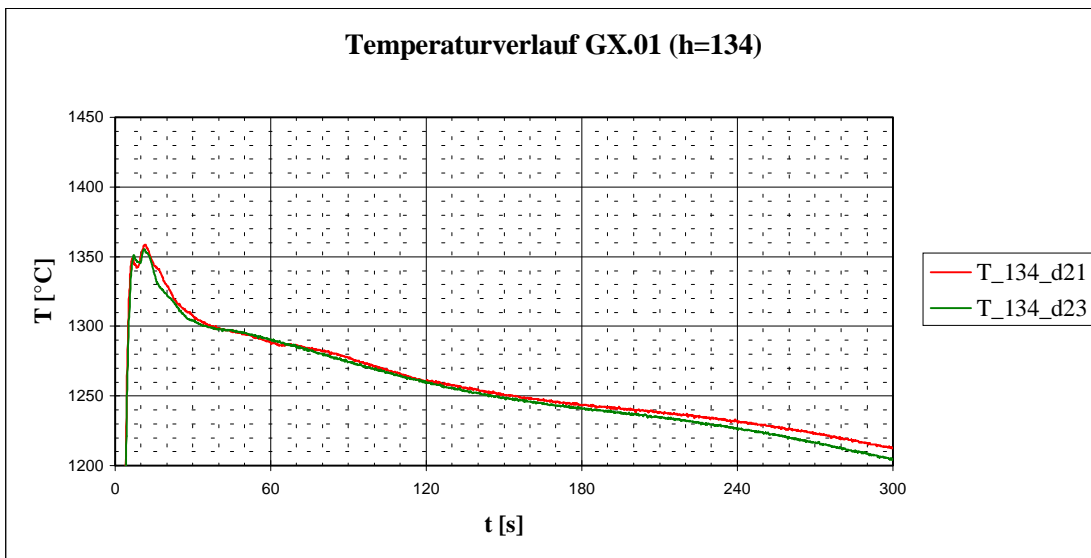


Bild 39: Temperaturverlauf bei T_134

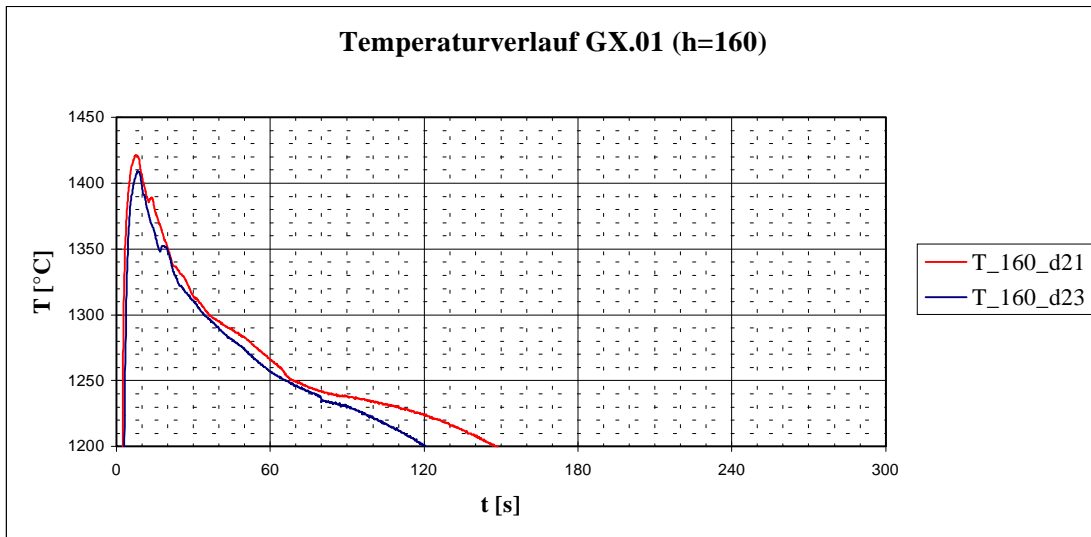


Bild 40: Temperaturverlauf bei T_160

6.2. Aufheizverhalten einer Graphitform

Der Versuch GX.02. diente der Ermittlung des Aufheizverhaltens einer Graphitform, des Erstarrungsverhaltens der Schmelze und der Standzeit der Form. Die Abmaße der Form und des Gußstückes sowie die Meßanordnung sind Bild 41 zu entnehmen. Als Gießwerkstoff diente wiederum ein G-X 300 CrMo 15 3. Die Gießtemperatur betrug bei diesem Versuch 1400 °C. Es wurde im Schwerkraftguß gegossen.

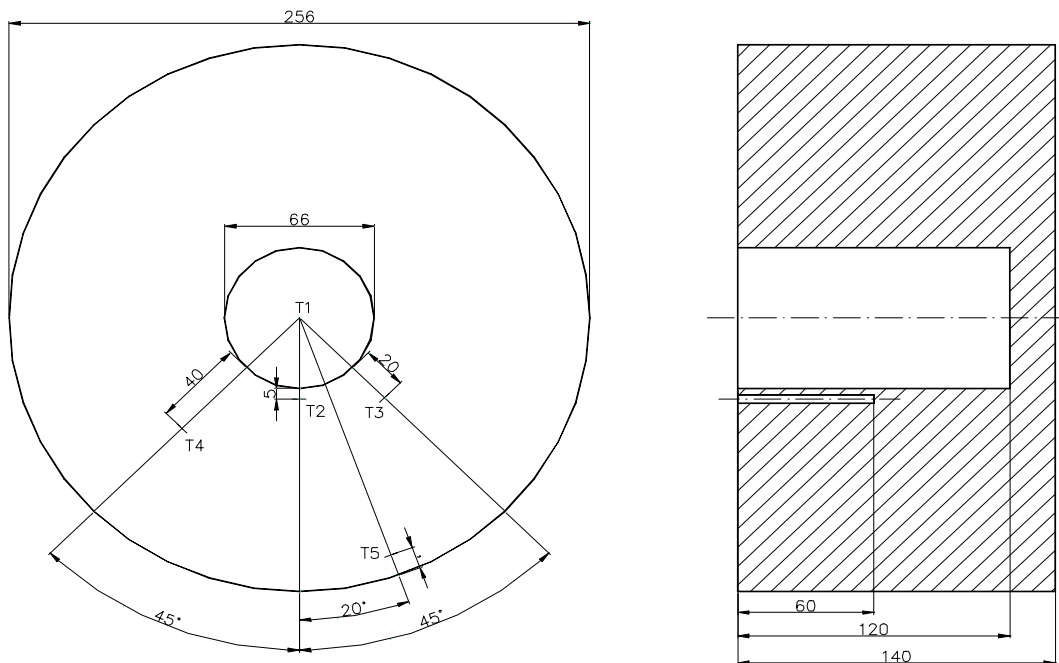


Bild 41: Abmaße und Meßanordnung beim Versuch GX.02.

Die Darstellung des Versuches über die volle Zeitdauer zeigt die Aufheizung der Graphitform bei der gewählten Taktzeit von ca. 10 Minuten. Dabei ist festzustellen, daß sich der Erstarrungsverlauf bei Erhöhung der Formtemperatur kaum ändert. Dies trifft zumindest bis zu einer Formtemperatur von 500 °C zu. Bild 42 zeigt den Versuchsverlauf.

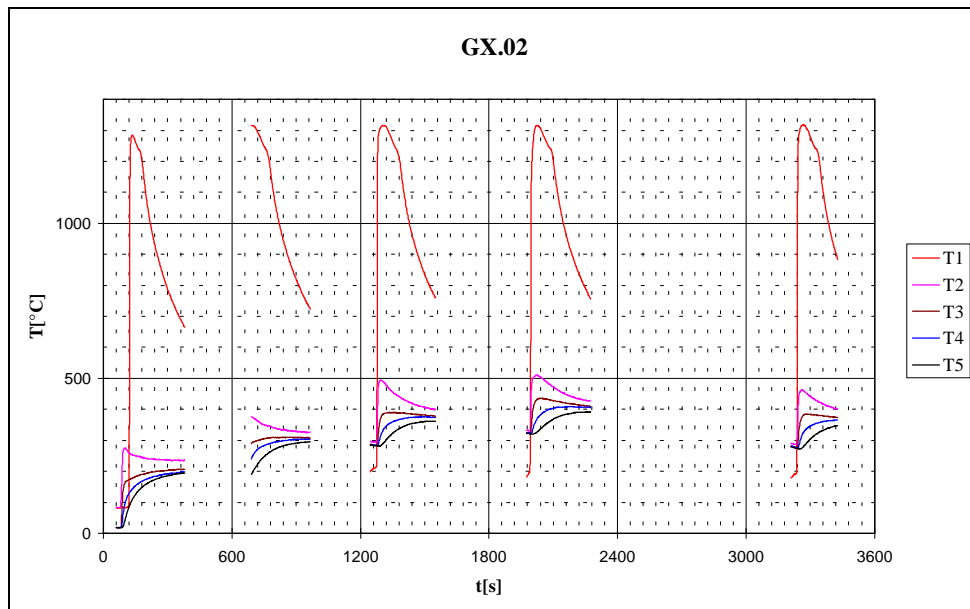


Bild 42: Temperaturverlauf GX.02.

Die Temperaturen am Meßpunkt T1 (im Zentrum des Gußstückes) nehmen bis zum Erreichen der Liquidustemperatur den gleichen Verlauf. Erst danach kühlt das Gußstück in der kalten Form schneller ab. Die Unterschiede zwischen den anderen Abgüssen sind gering. Bild 43 zeigt diese Gegenüberstellung der Temperaturen am Meßpunkt T1.

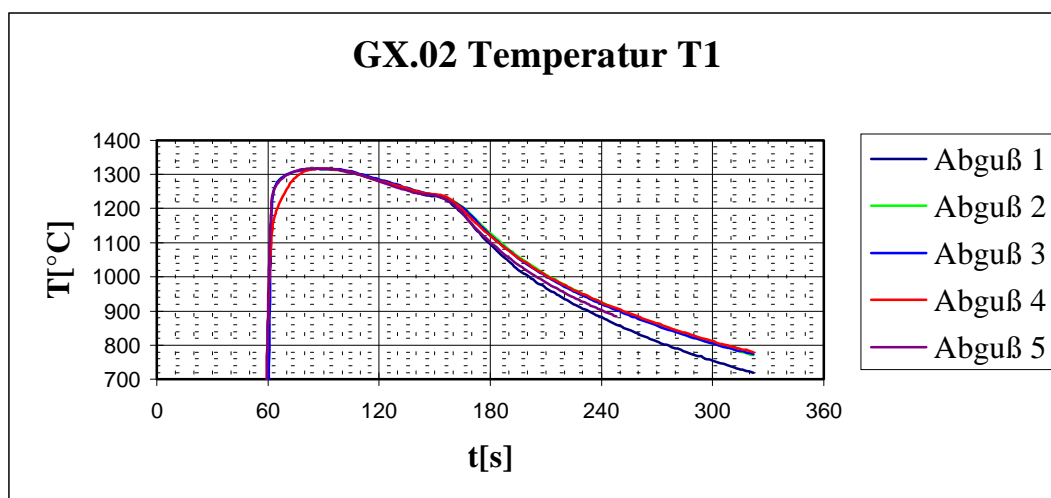


Bild 43: Temperaturverlauf GX.02. bei T1

Zur Standzeit ist zu sagen, daß unter den Bedingungen des Schwerkraftgusses keine hohen Standzeiten zu erwarten sind. Es kommt an den Stellen, wo der Gießstrahl auftrifft zu Beeinträchtigungen der Form. Die Folge sind Auswaschungen, die bereits beim ersten Abguß auftraten und sich bei jedem weiteren Versuch verstärkten. Dies zeigte auch ein Versuch an einem realen Gußstück, bei dem diese Auswaschungen nur im Eingußbereich auftraten. In den Bereichen, in denen die Formfüllung steigend war, trat keine Beeinträchtigung der Form auf.

6.3. Erstarrungsverhalten bei vorgewärmten Formen

Das Erstarrungsverhalten der Schmelze bei unterschiedlichen Formtemperaturen ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Versuches GX.02. gleich. Dieses Ergebnis sollte mit einem weiteren Versuch bestätigt werden. Es wurden zwei identische Formen aus Graphit verwendet. Eine Form wurde vor dem Versuch auf 500 °C vorgeheizt, während die andere bei Raumtemperatur belassen wurde. Die Formen und Meßanordnung entsprechen Bild 41 mit dem Unterschied, daß die Dicke der Form nur 60 mm betrug und die Meßpunkte 20 mm tief waren. Es wurden nur die Meßpunkte T1 und T2 besetzt. Bild 44 zeigt den Verlauf des Versuches.

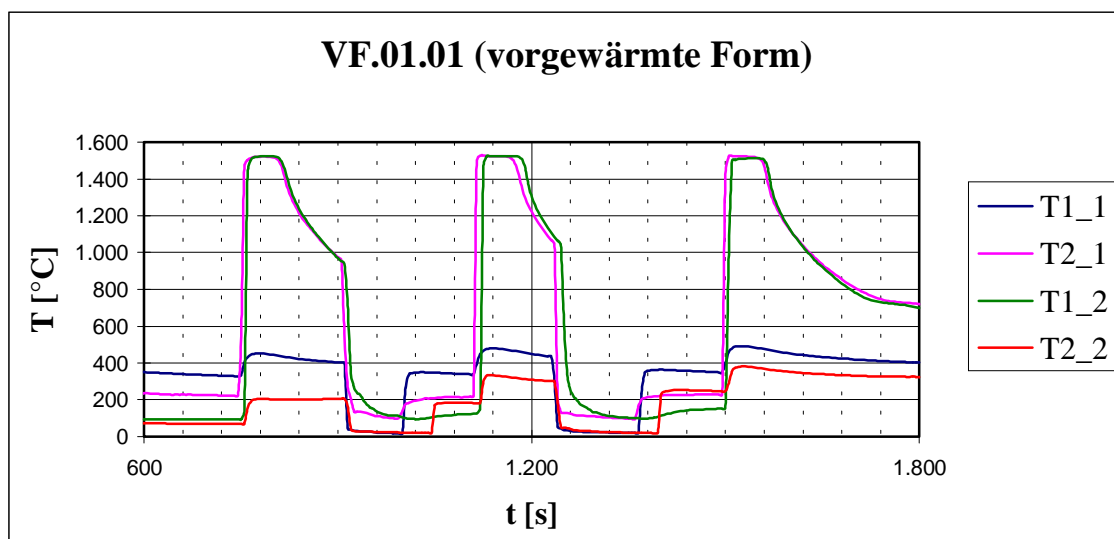


Bild 44: Temperaturverlauf beim Versuch VF.01

Bild 45 veranschaulicht die Temperaturen am Meßpunkt T1. Es bestätigte sich die Annahme, daß der Erstarrungsverlauf auch bei unterschiedlichen Formtemperaturen gleich ist.

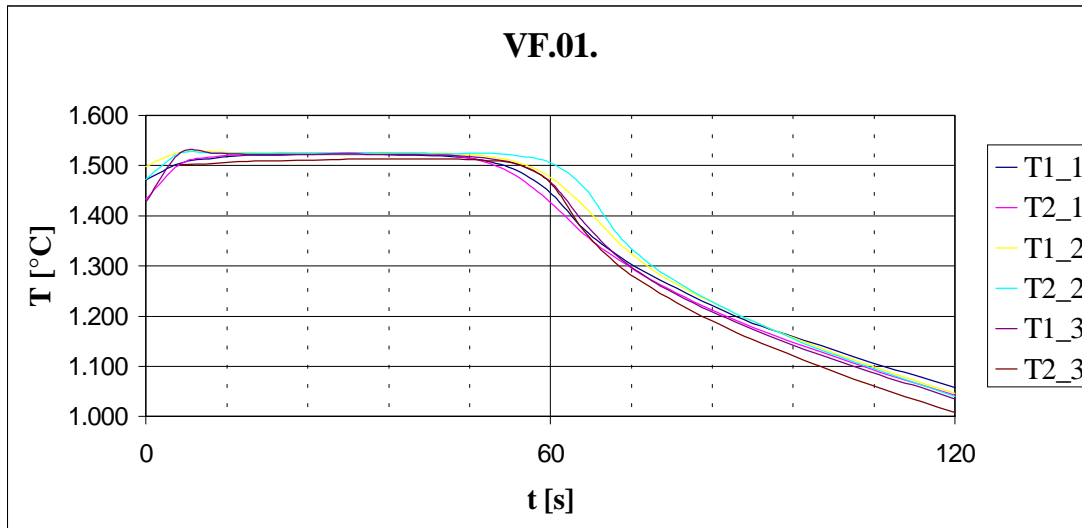


Bild 45: Temperaturverlauf an der Meßstelle T1 bei Versuch VF.01

6.4. Zusammenfassende Bewertung der Experimente

Die Erprobung der Laborgießanlage wurde erfolgreich durchgeführt. Damit ist der Nachweis erbracht, daß das Niederdruck-Gießverfahren für Gußeisen und Stahl anwendbar ist. Quarzglas eignet sich als Material für das Steigrohr. Die Temperatur im Niederdruckofen sollte der Gießtemperatur der Schmelze entsprechen. Die Speisung des Gußstückes ist sonst nicht über das Steigrohr möglich. Die Schmelze erstarrt unter diesen Bedingungen im Steigrohr zuerst. Im Bereich der Durchführung durch den Deckel muß das Steigrohr isoliert werden, um eine vorzeitige Erstarrung zu verhindern.

Die Anwendung von Graphit als Formwerkstoff für Kokillen im Niederdruck-Gießverfahren von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen, vornehmlich Gußeisen, ist möglich. Es gewährleistet eine schnelle Abkühlung des Gußstückes. Eine gerichtete Erstarrung, bei der die Schmelze im Steigrohr zuletzt erstarrt, ist dadurch möglich. Die Formtemperatur hat im Bereich zwischen 20 °C und 500 °C keinen wesentlichen Einfluß auf die Erstarrung des Gußstückes. Die Versuche wurden im Schwerkraftguß durchgeführt. Die Formen wurden durch den auftreffenden Gießstrahl beschädigt. Bereits nach wenigen Abgüssen sind die Stellen, an denen die Schmelze mit hoher Geschwindigkeit fließt, erkennbar. Hier zeigte sich deutlich ein Nachteil des Schwerkraftgusses, der mit Hilfe der gesteuerten Formfüllung behoben werden kann.

7. Gesteuerte Formfüllung

7.1. Problematik

Bei sehr hohen Formfüllgeschwindigkeiten, wie sie beispielsweise beim Druckgießen angewandt werden, kommt es vor, daß Luft in der Schmelze eingeschlossen wird. Einige Beispiele dafür sind auf der Homepage von Markus Schmid zu finden [55]. Eines dieser Beispiele zeigt Bild 46. Hier wird eine ca. 0,15 m hohe Platte von unten mit gefärbten Wasser gefüllt. Die Anordnung entspricht der des Niederdruckgießens. Die Geschwindigkeit ist sehr hoch. Sie verdeutlicht aber das Problem.

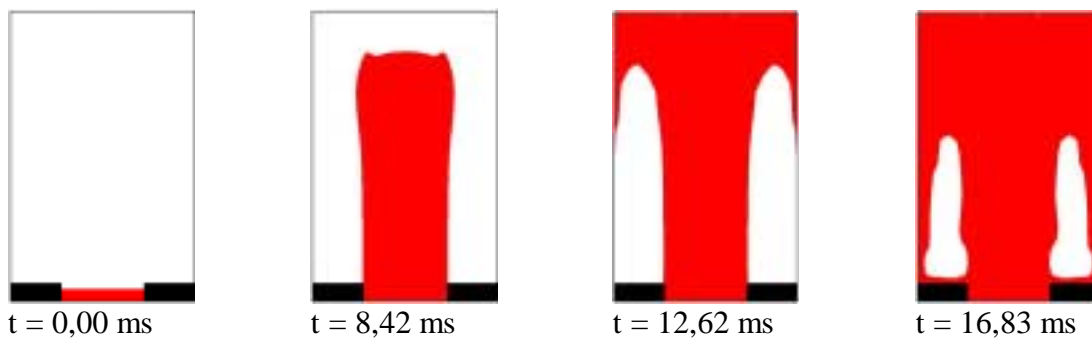


Bild 46: Füllen einer Platte mit $v = 16.0$ m/s am Einguß [55]

Die Schmelze wird von einem kleinen Querschnitt in einen großen Querschnitt gefördert. Sie läuft bei der Geschwindigkeit aber nicht breit, sondern schießt in einem Gießstrahl, wie bei einem Springbrunnen in die Höhe. Der entstehende Gießstrahl prallt auf der gegenüberliegenden Wand ab und schließt in diesem Beispiel zwei Luftblasen ein. Diese Luftblasen stellen beim Niederdruckgießen Gußfehler dar, wenn sie nicht mehr entweichen können. Dieses Ergebnis wurde sowohl experimentell als auch numerisch erzielt.

Ein weiteres Beispiel, das Füllen eines mäanderförmigen Formhohlraumes, zeigt Bild 47.

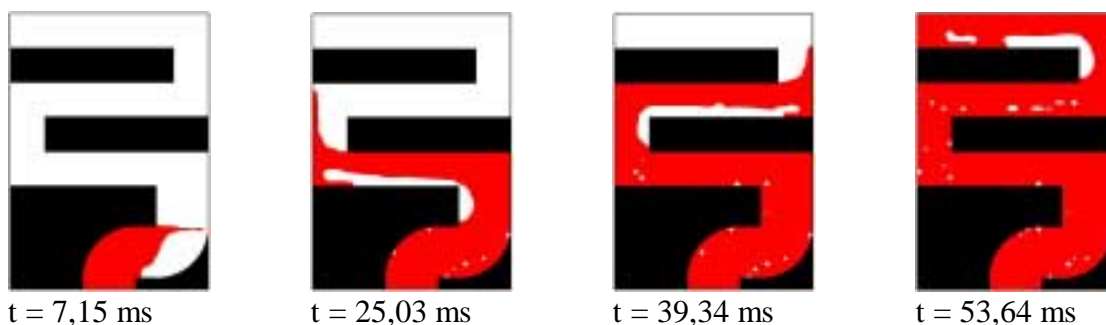


Bild 47: Füllen eines mäanderförmigen Formhohlraum mit $v = 8,7$ m/s am Einguß [55]

In diesem Beispiel wird die Flüssigkeit unter mehrmaligen Richtungsänderungen in die Form gefüllt. Durch die sehr hohe Geschwindigkeit werden an den Stellen der Form, an denen die Flüssigkeit umgelenkt wird, Luft eingeschlossen. Diese wird im weiteren Verlauf in der Flüssigkeit verwirbelt.

Die Geschwindigkeiten sind in beiden Beispielen so hoch, wie sie weder beim Schwerkraft- noch beim Niederdruckguß vorkommen. Jedoch können die hier aufgezeigten Fehler auch bei kleineren Geschwindigkeiten auftreten. Bei den Untersuchungen zum Niederdruck-Vollformgießen traten ebenfalls Probleme mit einer ungleichmäßigen Formfüllung auf [17][40][41][54]. Es handelt sich hierbei um Niederdruck-Gießversuche mit einer Aluminiumlegierung. Die Untersuchungen wurden an einer Zugstabtraube mit vier Zugstäben durchgeführt. Ein Aspekt der Versuche war die systematische Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher linearer Druckerhöhungen während des Gießens. Damit sind nach Gleichung G.8 unterschiedliche Gießgeschwindigkeiten zu realisieren. Bei kleinen Geschwindigkeiten gleicht sich die Steighöhe der Schmelze in den einzelnen Zugstäben einander an. Bei großen Geschwindigkeiten werden zuerst die inneren Stäbe, die dem Anguß am nächsten liegen, gefüllt. Die äußeren Stäbe werden erst später gefüllt. Dabei kann es vorkommen, daß die Schmelze über den oberen Querlauf zu den äußeren Stäben läuft und diese von oben füllt. In Bild 48 ist ein solcher Versuch dargestellt.

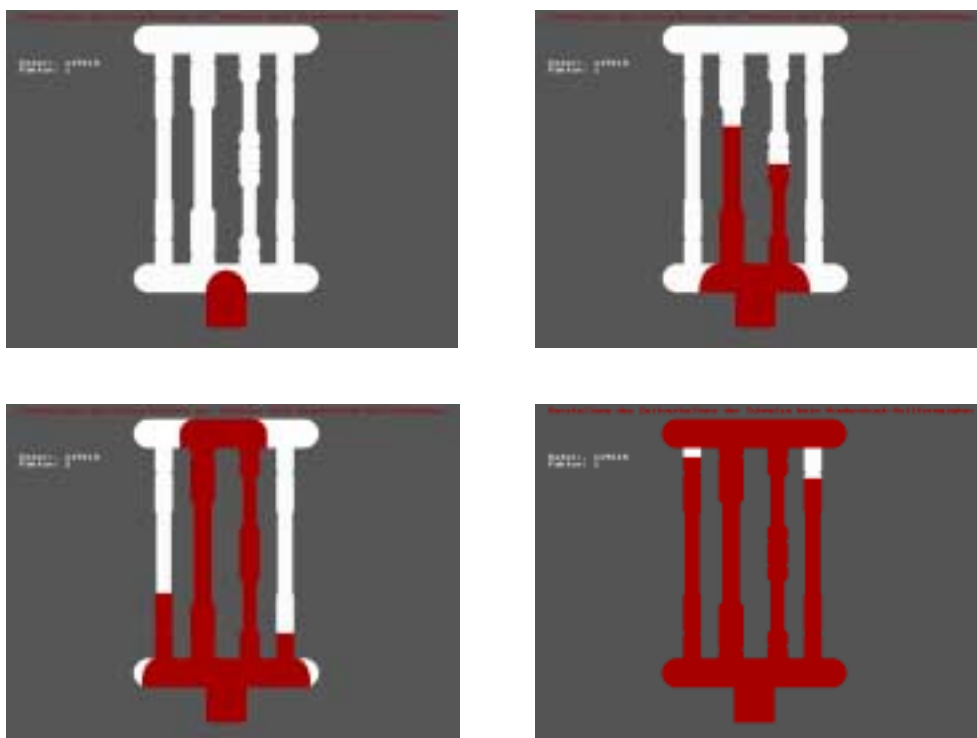


Bild 48: Formfüllung von Zugstäben mit schnellen Druckerstieg

Die Folge können Einschlüsse sein. Bild 49 zeigt eine Röntgenaufnahme von Zugstäben, die teilweise von oben gefüllt wurden. Dabei wurden Polystyrol, das später zersetzt wurde, oder Luft eingeschlossen.



Bild 49: Gußfehler in Folge der Formfüllung von oben und unten

Durch die Kenntnis der Vorgänge während des Gießens können solche Gußfehler vermieden werden. Dazu ist es notwendig, den Gießprozeß mittels mathematischer Modelle zu beschreiben und mit ihnen den Prozeß zu simulieren. Aus den Ergebnissen kann die Steuerung des Gießprozesses abgeleitet werden. Die andere Möglichkeit ist, daß eine Steuerung, die möglicherweise auf Erfahrungswerten beruht, vorgegeben wird und der Gießprozeß damit simuliert wird. Als Ergebnis steht dann die Prognose für die Gußstückqualität.

7.2. Lösungen zur Realisierung der gesteuerten Formfüllung

7.2.1. Lösung für die gesteuerte Formfüllung einfacher Geometrien

Die gesteuerte Formfüllung ist dann gegeben, wenn die Füllhöhe der Schmelze in allen Gußstückbereichen zu jeder Zeit gleich ist. Das bedeutet, daß genügend Zeit vorhanden ist, um auftretende Druckunterschiede auszugleichen. Beim Niederdruckgießen folgt die Füllhöhe der Schmelze in erster Näherung dem auf das Schmelzebad wirkenden Druck im Druckbehälter. Bei einem sehr schnellen Druckanstieg im Druckbehälter ändert sich das. Die Schmelze muß erst beschleunigt werden. In dieser Zeit steigt der Druck im Druckbehälter jedoch soweit, daß die Druckdifferenz zwischen dem Schwerdruck in der Schmelze und dem Druck im Druckbehälter immer größer wird. Um so größer wird jedoch auch die

Geschwindigkeit der Schmelze im Gußstück. Durch das Auftreten von Querschnittsänderungen werden zusätzliche Beschleunigungen erreicht. Ebenfalls durch Querschnittsänderungen werden unterschiedliche Durchflußmengen bei gleichen Geschwindigkeiten erzielt. Diese wirken sich dann auf die Füllhöhe aus. Die Füllhöhe wiederum beeinflusst den Schweredruck in der Schmelze und dieser, die für die Beschleunigung der Schmelze maßgebliche Druckdifferenz. Aus Gleichung G.8 für die Durchflußgeschwindigkeit und Gleichung G.10 für die Querschnittsänderung ergibt sich das geförderte Schmelzevolumen und die Steighöhe. Mit dem Rechnerprogramm Microsoft Excel kann für beliebige Querschnittswechsel die Füllzeit, -geschwindigkeit und -höhe abgeschätzt werden. Die Geschwindigkeit im Steigrohr ergibt sich aus Gleichung G.50.

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta p - \rho \cdot g \cdot h)}{\rho}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}}} \quad \text{G.50}$$

Druckverluste infolge von Gegendruck, Reibung und Widerständen werden dabei nicht berücksichtigt. Die momentane Höhe der Schmelze im Steigrohr wird durch Gleichung G.51 beschrieben. Die pro Zeiteinheit Δt mit der Geschwindigkeit v_2 durchflossene Höhe des Steigrohrs wird zu der aktuellen Höhe addiert und ergibt die neue Höhe für den nächsten Berechnungsschritt.

$$h = h + v_2 \cdot \Delta t \quad \text{G.51}$$

Die in den einzelnen Gußstückbereichen aktuellen Werte für die Geschwindigkeit v_3 beziehen sich auf die Geschwindigkeit im Steigrohr. Sie berechnet sich nach Gleichung G.52. Die Steighöhe im Gußstück ergibt sich damit nach Gleichung G.53.

$$v_3 = \frac{A_2}{A_3} \cdot v_2 \quad \text{G.52}$$

$$h = h + \frac{A_2}{A_3} \cdot v_2 \cdot \Delta t \quad \text{G.53}$$

Mit Kenntnis der Größe der Geschwindigkeit v_3 läßt sich abschätzen, ob die Schmelze die Form beim Aufprall auf gegenüberliegende Formwände beschädigen kann. Die Geschwindigkeit läßt sich an beliebigen Stellen zu beliebigen Zeiten ermitteln. Damit können Geschwindigkeitsspitzen erkannt werden. Mögliche Beschädigungen der Form durch zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten der Schmelze werden verhindert. Für das Auftreffen der Schmelze auf gegenüberliegende Formwände ist beim Niederdruckgießen die Höhe relevant, die die Schmelze mit einer bestimmten Geschwindigkeit ohne weitere Beschleunigung erreicht. Diese errechnet sich nach Gleichung G.54.

$$h = \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad \text{G.54}$$

Die ermittelten Werte beziehen sich auf einen Ersatzquerschnitt. Dieser Querschnitt stellt einen runden Querschnitt dar. Die Geschwindigkeitswerte sind folglich Mittelwerte. Querschnittsänderungen in den einzelnen Ebenen werden nicht berücksichtigt. Parallel verlaufende Querschnitte wie in Bild 48 müssen nacheinander berechnet werden. Mit dieser einfachen Lösung läßt sich abschätzen bei welchen Druckanstiegszeiten die Abweichung der tatsächlichen von der theoretischen Füllhöhe und die Beschleunigung durch die Druckdifferenz gering wird.

7.2.2. Kommerzielle Simulationssoftware

Es existieren verschiedene kommerzielle Softwarelösungen, die sowohl den Bereich der Formfüllung als auch den der Erstarrung berücksichtigen. Solche Softwarelösungen sind beispielsweise MAGMASoft [57], NOVACAST [56] und FLOW-3D [58]. Diese Programme benötigen normalerweise Workstations. Die Entwicklung geht dahin, diese Programme auch für den PC bereitzustellen. Die Berechnungen mit diesen Softwareprodukten sind sehr umfangreich. Das bezieht sich sowohl auf die Rechenzeit als auch den Speicherbedarf. Rechenzeiten von mehreren Stunden sind normal. Die Berechnung der Formfüllung von komplexen Gußteilen kann aber auch Tage und Wochen dauern. Die Modellierung erfolgt in mehreren Teilschritten. Zuerst ist das Gußstück als 3D-Modell zu erstellen. Dazu können CAD-Programme verwendet werden. Der zweite Schritt ist die Vernetzung des 3D-Modells.

Bei diesem Schritt wird entscheidend Einfluß auf die Genauigkeit der Berechnung genommen. Je feiner die Vernetzung ist, um so genauer werden die Ergebnisse, aber desto länger dauert die Berechnung. Hier muß entschieden werden, welche Genauigkeit erforderlich ist, um gute Resultate in einer angemessenen Zeit zu erhalten. Der nächste Schritt ist das Einstellen der zur Berechnung notwendigen Werkstoffparameter. Diese Parameter stellen oft einen Schwachpunkt bei der Simulation von Strömungs- und Erstarrungsvorgängen dar. Sie müssen für den speziellen Fall ermittelt werden und sind oft nicht auf andere Fälle übertragbar. Die im Labor ermittelten Werte können von denen in der Praxis aufgrund der dort herrschenden Bedingungen abweichen. Die mit ungenauen Werten ermittelten Ergebnisse werden nicht vollständig falsch sein, aber von der Realität um so mehr abweichen, je ungenauer sie sind. Für das Gießen relevante Parameter sind: Viskosität, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Oberflächenspannung. Diese Werte sind temperaturabhängig und nicht immer in der Literatur zu finden. Die Hersteller der Simulationssoftware bieten meist eine Datenbank für die Parameter der gängigsten Werkstoffe an. Für den Fall, daß der erforderliche Werkstoff in dieser Datenbank nicht vorhanden ist, müssen diese Parameter in eigenen Versuchen ermittelt werden. Das betrifft sowohl die Guß- als auch die Formwerkstoffe. Die Art und Weise, wie die oben genannten Parameter auch bei Temperaturen über 1000 °C zu ermitteln sind, wird von Quedstedt [59] beschrieben.

Als nächstes müssen die Gießparameter vorgegeben werden. Diese sind: Formfüllzeit, Gießtemperatur und Formtemperatur. In einem weiteren Schritt muß das mathematische Berechnungsmodell angegeben werden. Es hat Einfluß auf die Genauigkeit der Berechnung, aber auch auf die Dauer der Berechnung. Es gibt vier mögliche Berechnungsmodelle. Bei den in der Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde für die Berechnung die Navier-Stokes-Gleichung gewählt.

Jetzt kann die Berechnung gestartet werden. Je nach Größe und Komplexität des Gußstücks und der Genauigkeit der Berechnung wird sie einen Zeitraum von Stunden, Tagen oder Wochen benötigen.

Nach erfolgter Berechnung des Formfüllvorganges und der Erstarrung kann die Auswertung erfolgen. Bei dieser kann das Gußteil zu verschiedenen Zeiten der Formfüllung in verschiedenen Perspektiven und Schnitten mit unterschiedlichen Eigenschaften ausgewertet werden. Diese Eigenschaften sind die Temperatur, die Geschwindigkeit und die Richtung der Geschwindigkeit.

7.3. Beispiele

7.3.1. Einfache Geometrien

7.3.1.1. Versuchsaufbau

Als erstes Beispiel wurde eine Geometrie gewählt, die eine einfache Berechnung gewährleistet, aber auch die Problematik noch einmal verdeutlichen soll. Der Formhohlraum besteht aus einem Einguß, einem unteren Querlauf, zwei getrennten Formhohlräumen und einem oberen Querlauf. Der Einguß befindet sich entsprechend dem Niederdruck-Gießverfahrens unten. Der untere Querlauf dient der Verteilung der Flüssigkeit in die beiden Formhohlräume. Die Formhohlräume bestehen jeweils aus zwei Quadern gleicher Länge. Während die oberen Quader die gleichen Abmessungen haben, unterscheiden sich die beiden unteren extrem in ihrer Breite. Während der Querschnitt des einen Quaders eine große Durchflußmenge gewährleistet, wurde der andere so gewählt, daß er nur eine kleine Durchflußmenge zuläßt. Bild 50 zeigt den Versuchsaufbau. Als Modellflüssigkeit wurde Wasser verwendet.

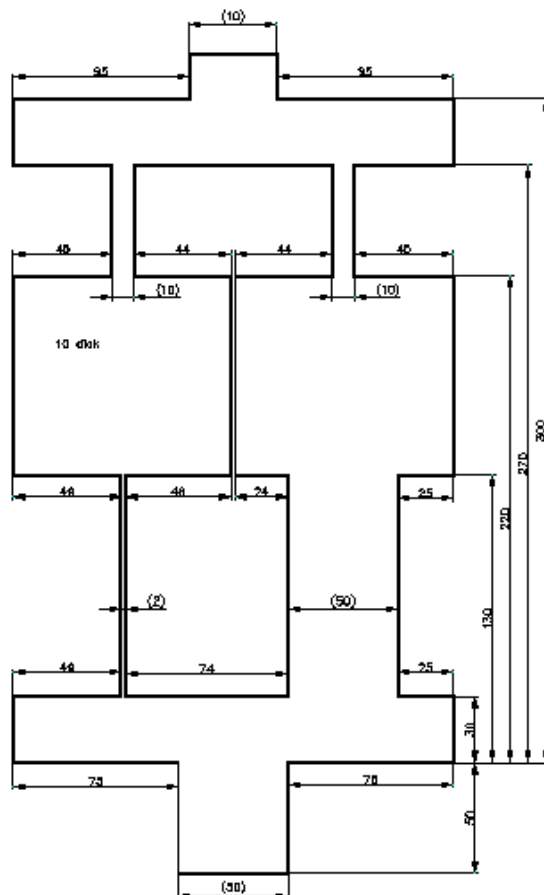


Bild 50: Versuchsaufbau mit Abmessungen in Beispiel 1

7.3.1.2. Berechnung mit dem Rechnerprogramm Microsoft Excel

Mit Hilfe der Gleichungen G.50 - G.54 ist es möglich, die Abschätzung der Geschwindigkeiten und der Steighöhe in der Form mit einer Tabellenkalkulation durchzuführen. Hier wurde das Rechnerprogramm Microsoft Excel verwendet. Für die in diesem Beispiel gewählte Geometrie ist es sinnvoll, den linken und den rechten Querschnitt getrennt zu betrachten. Bei der Berechnung wurde der jeweils nicht betrachtete Querschnitt als nicht existent angenommen. Das heißt, seine Fläche wurde in den jeweiligen Querschnitten nicht berücksichtigt. Im Bereich des sehr kleinen linken Querschnitts kommt es in der Berechnung zu Instabilitäten. Diese können durch eine Erhöhung der Berechnungsgenauigkeit behoben werden. Die Erhöhung der Berechnungsgenauigkeit geht aber einher mit einer Erhöhung der Anzahl der Berechnungen. Das verwendete Tabellenkalkulationsprogramm begrenzt die Anzahl der Berechnungen. Die Ungenauigkeiten der Berechnung befinden sich an den Stellen, wo die Formfüllhöhe dem hydrostatischen Druck entspricht. Durch die langsame Erhöhung des Druckes pendelt der Wert der Füllhöhe und der Geschwindigkeit um diesen Wert. In den anderen für die Auswertung interessanten Bereichen sind derartige Ungenauigkeiten nicht zu beobachten. Der zur Berechnung verwendete Dichtewert für Wasser beträgt 1000 kg/m^3 . Die Querschnitte sind dem Bild 50 zu entnehmen. Der Anschnittdurchmesser wurde mit $\varnothing 19 \text{ mm}$ gewählt. Er geht in die Berechnung mit einer Höhe von 50 mm ein. Der maximal mögliche Druck beträgt 0,045 MPa, das entspricht einer Druckhöhe von 0,45 m. Die Formfüllung geht noch 50 mm über den oberen Querlauf hinaus. Der Querschnitt für dieses Stück wurde auf $0,0001 \text{ m}^2$ festgelegt. Die Bilder 51 bis 56 zeigen die berechnete Formfüllung. In den Bildern bezeichnet h die berechnete Füllhöhe, h_{gerade} die Druckhöhe, die dem angelegten Druck entspricht, und v_2 die Geschwindigkeit im Anschnitt. Die Geschwindigkeit an den entsprechenden Stellen der Form ergibt sich aus Gleichung G.52. Sie sind in den Bildern nicht dargestellt. Die Bilder 51, 52, 53 und 54 zeigen die Formfüllung des linken (dünnen) Querschnitts. In den Berechnungen wurde die Druckanstiegszeit variiert. Sie beträgt für den dünnen Querschnitt 1 s, 10 s, 30 s und 50 s. Bei einer Druckanstiegszeit von einer Sekunde weicht die berechnete Füllhöhe erheblich von der angelegten Druckhöhe ab. Die Folge ist eine relativ hohe Geschwindigkeit im Anschnitt. Diese Geschwindigkeit erhöht sich nach Gleichung G.52 in den dünneren Querschnitten noch. Je größer die Druckanstiegszeit wird, um so geringer wird der Abstand zwischen der berechneten Höhe und der vorgegebenen Druckhöhe. Damit sinken

auch die Geschwindigkeiten. Bei Druckanstiegszeiten von 50 s nähern sich die genannten Höhen allmählich an (Bild 54).

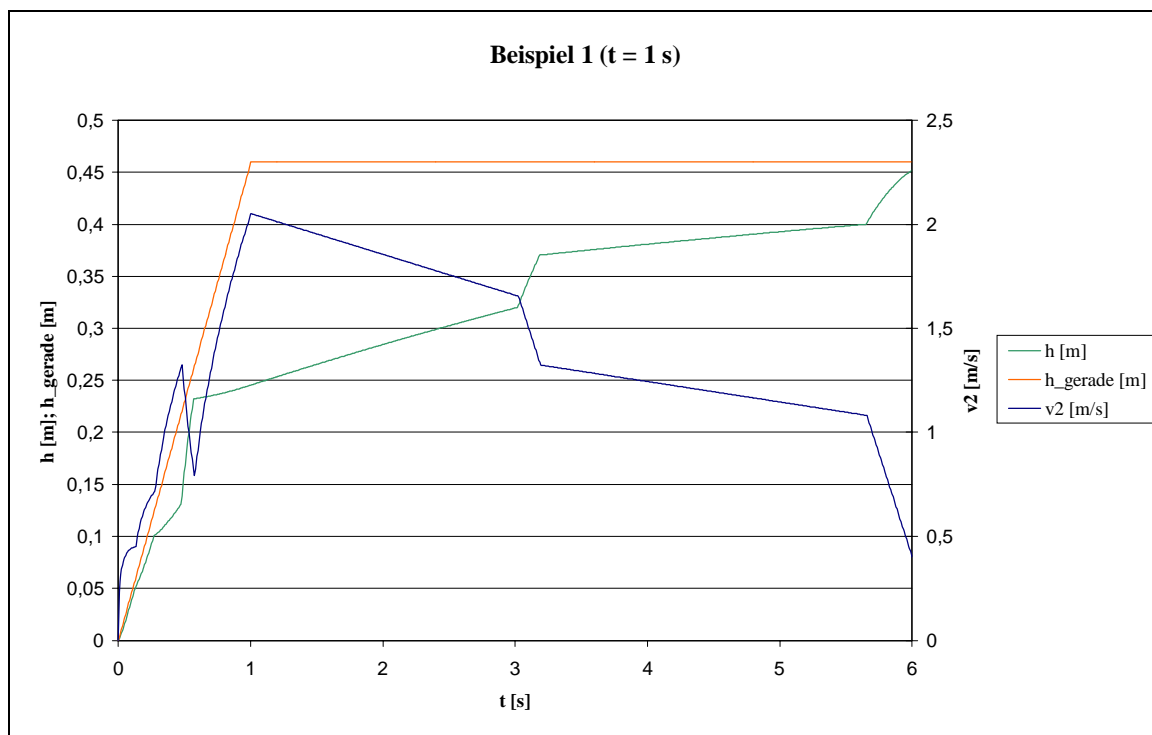


Bild 51: Formfüllung über den linken Querschnitt (Druckanstiegszeit t = 1 s)

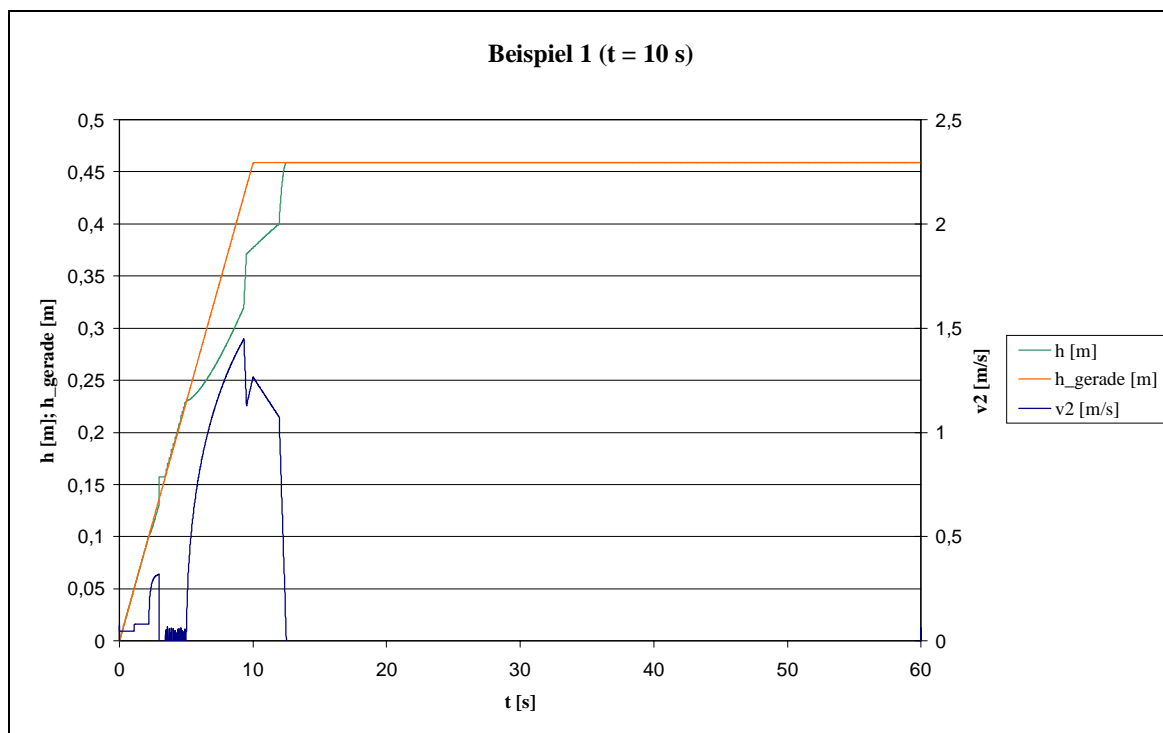


Bild 52: Formfüllung über den linken Querschnitt (Druckanstiegszeit t = 10 s)

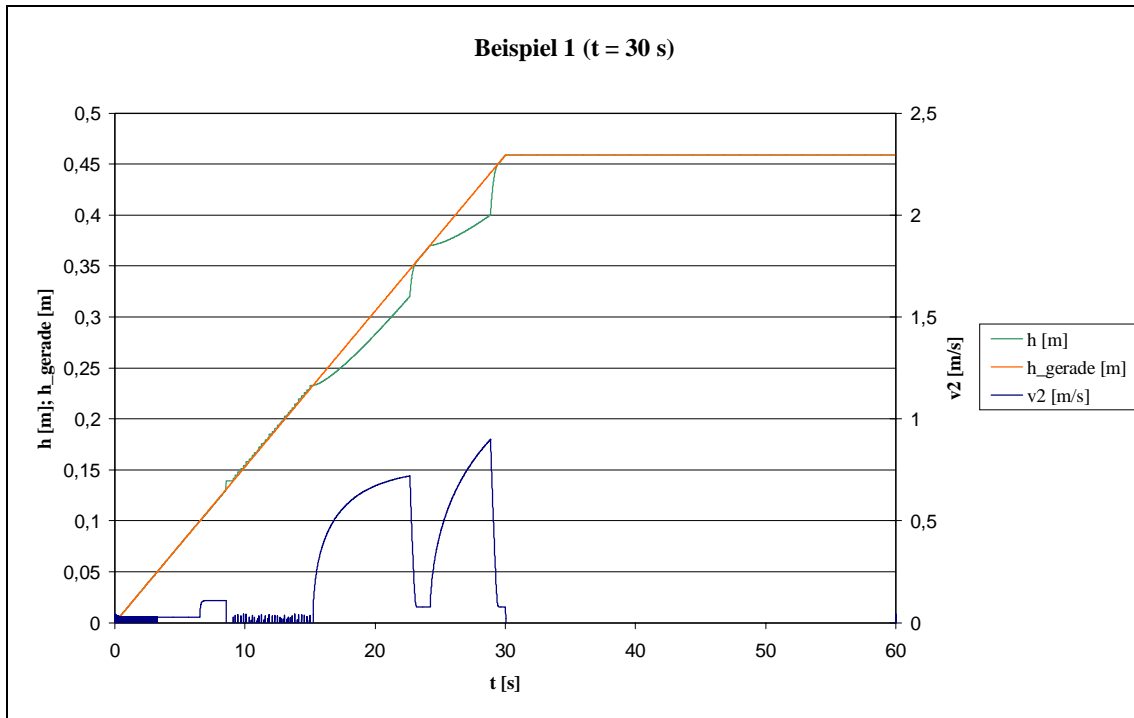


Bild 53: Formfüllung über den linken Querschnitt (Druckanstiegszeit $t = 30$ s)

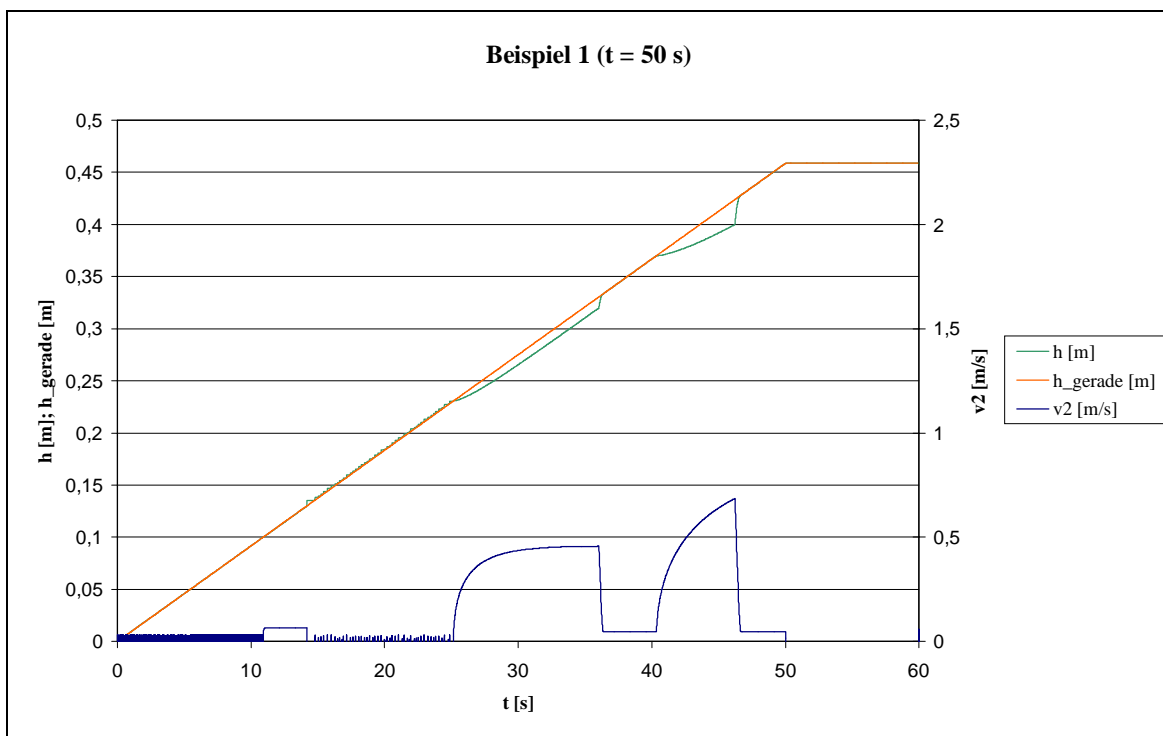


Bild 54: Formfüllung über den linken Querschnitt (Druckanstiegszeit $t = 50$ s)

In den Bildern 55 und 56 ist die Formfüllung des rechten Querschnitts dargestellt. Dieser ist gegenüber dem linken sehr groß. Bei einer Druckanstiegszeit von einer Sekunde weicht die berechnete Höhe von der angelegten Druckhöhe noch etwas ab. Dagegen sind sie bei einer

Druckanstiegszeit von 10 s fast gleich. Das zeigt sich auch in den geringen Geschwindigkeiten im Anschnitt. Diese betragen weniger als 0,35 m/s. Im Gegensatz dazu betragen die Geschwindigkeiten im linken Querschnitt bei einer Druckanstiegszeit von 10 s über 1,25 m/s.

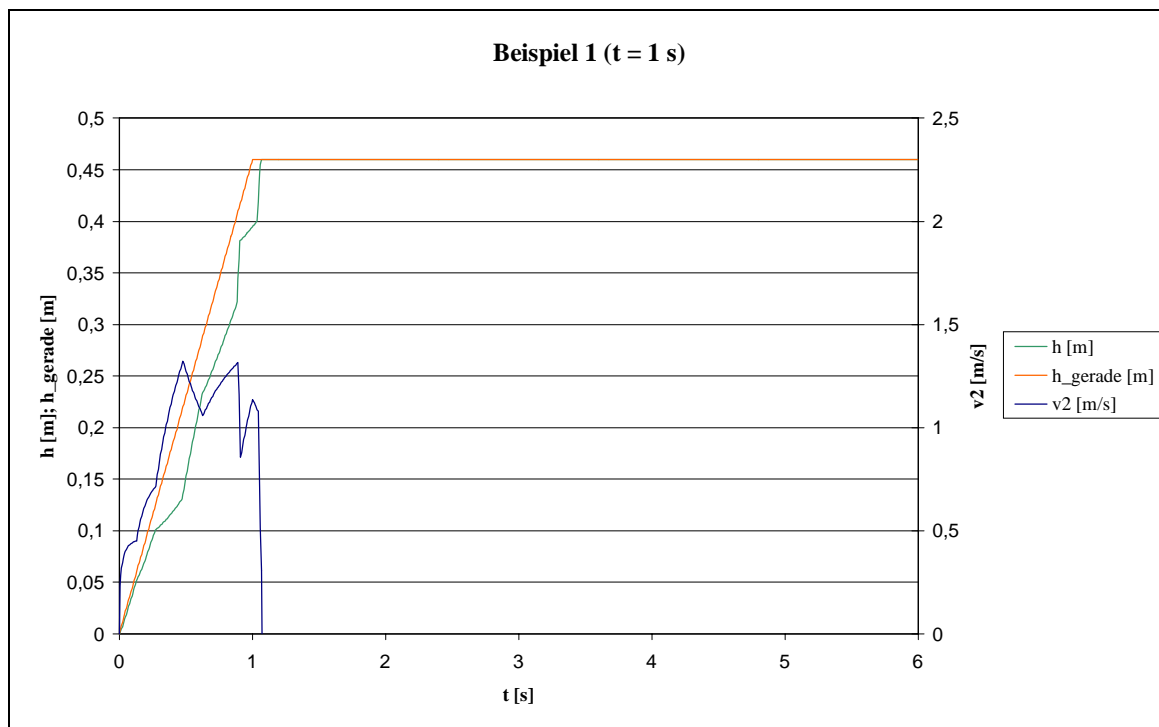


Bild 55: Formfüllung über den rechten Querschnitt (Druckanstiegszeit $t = 1$ s)

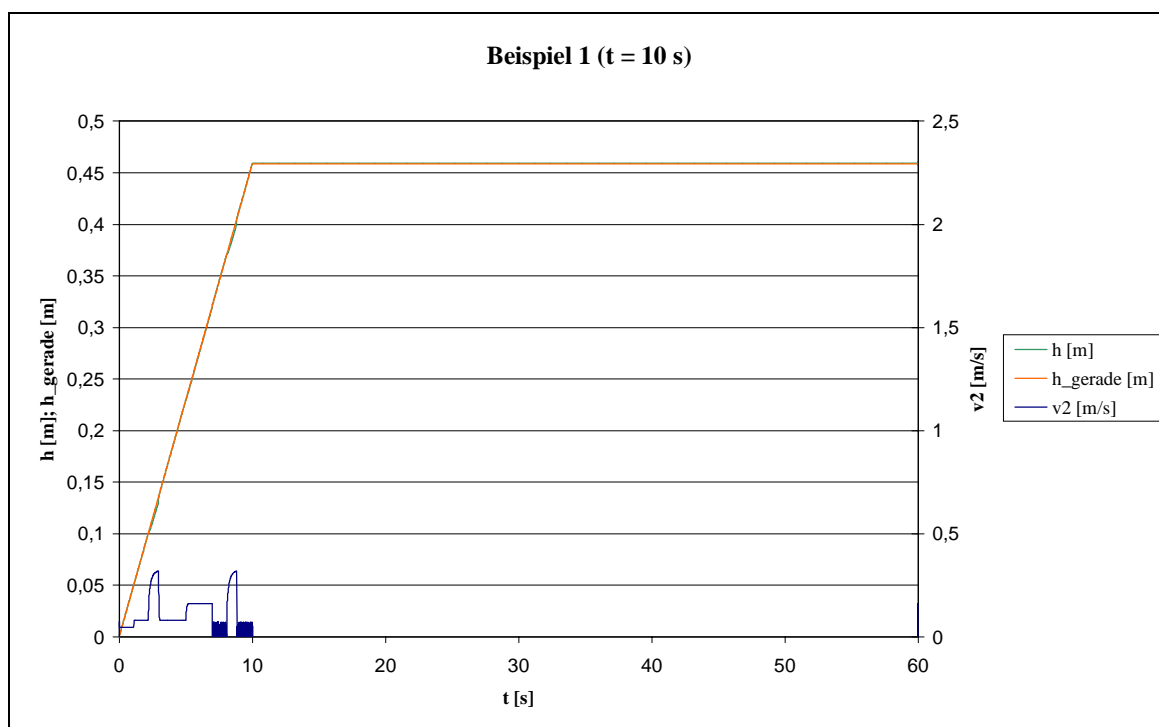


Bild 56: Formfüllung über den rechten Querschnitt (Druckanstiegszeit $t = 10$ s)

7.3.1.3. Berechnung mit dem Rechnerprogramm Magmasoft

Die in Bild 50 dargestellte Geometrie wurde mit AutoCAD R14 als 3D-Modell erstellt. Dieses Modell wurde in Magmasoft importiert und für die Formfüllzeiten 1 s, 10 s, 30 s und 50 s berechnet. Die Druckanstiegszeit in der Tabellenkalkulation ist die Zeit, in der der Druckanstieg erfolgt. Die Formfüllung kann einen längeren Zeitraum in Anspruch nehmen. Dagegen beschreibt die Formfüllzeit im Simulationsprogramm die Zeit, in der die Form vollständig gefüllt wird. Als Modellflüssigkeit wurde wieder Wasser verwendet. Temperaturabhängigkeiten wurden dadurch vermieden, indem die Wassertemperatur mit 25 °C und die Formtemperatur mit 20 °C gewählt wurden. Mit der Simulationssoftware ist es möglich, die Geschwindigkeiten in der Form zu bestimmten Zeiten aufzuzeichnen. In Abhängigkeit vom gefüllten Volumen wurden auszugsweise Bilder während der Berechnung der Formfüllung in 10 %- Schritten erstellt. Die Bilder 57, 58, 59 und 60 zeigen die Geschwindigkeiten in der Form bei einer Formfüllung von jeweils 80 % des Volumens und Formfüllzeiten von 1 s, 10 s, 30 s und 50 s.

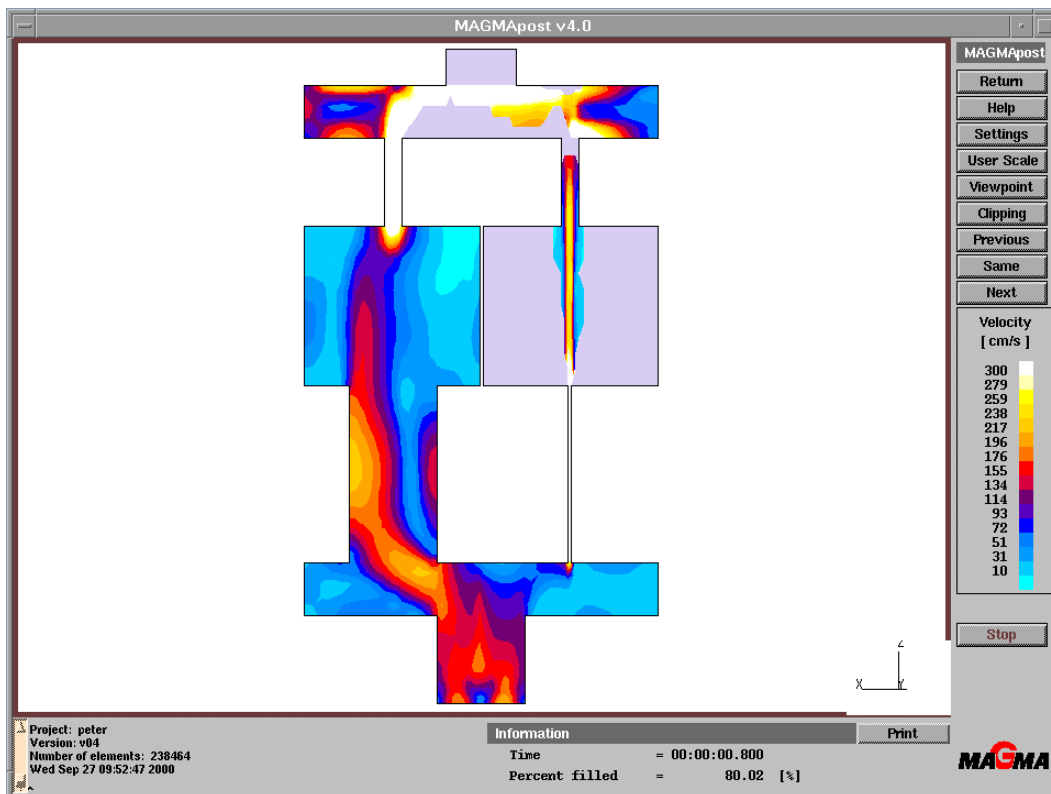


Bild 57: Formfüllung der Testgeometrie (Formfüllzeit $t = 1$ s)

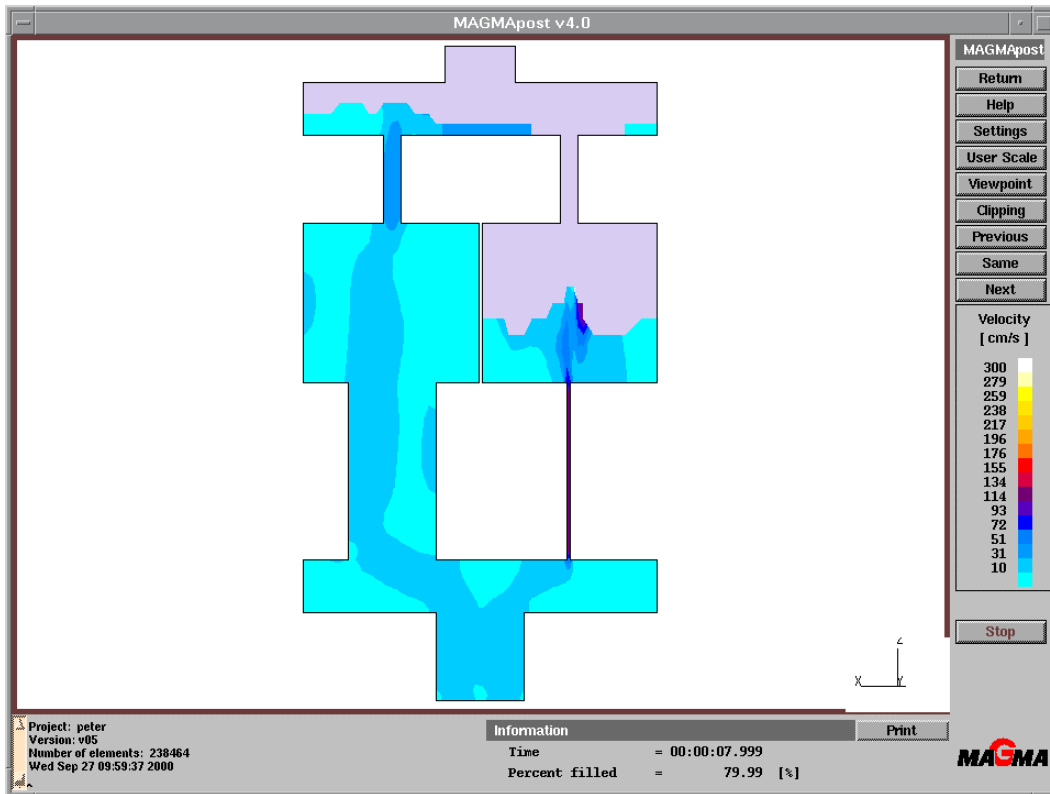


Bild 58: Formfüllung der Testgeometrie (Formfüllzeit $t = 10$ s)

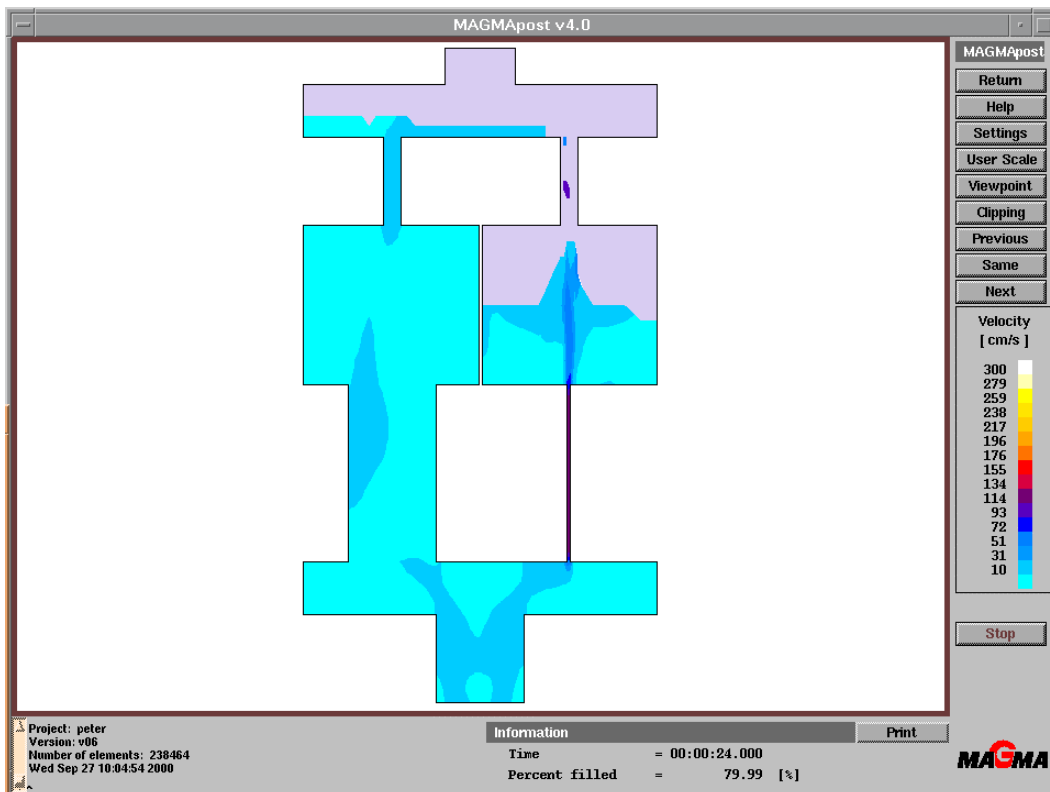


Bild 59: Formfüllung der Testgeometrie (Formfüllzeit $t = 30$ s)

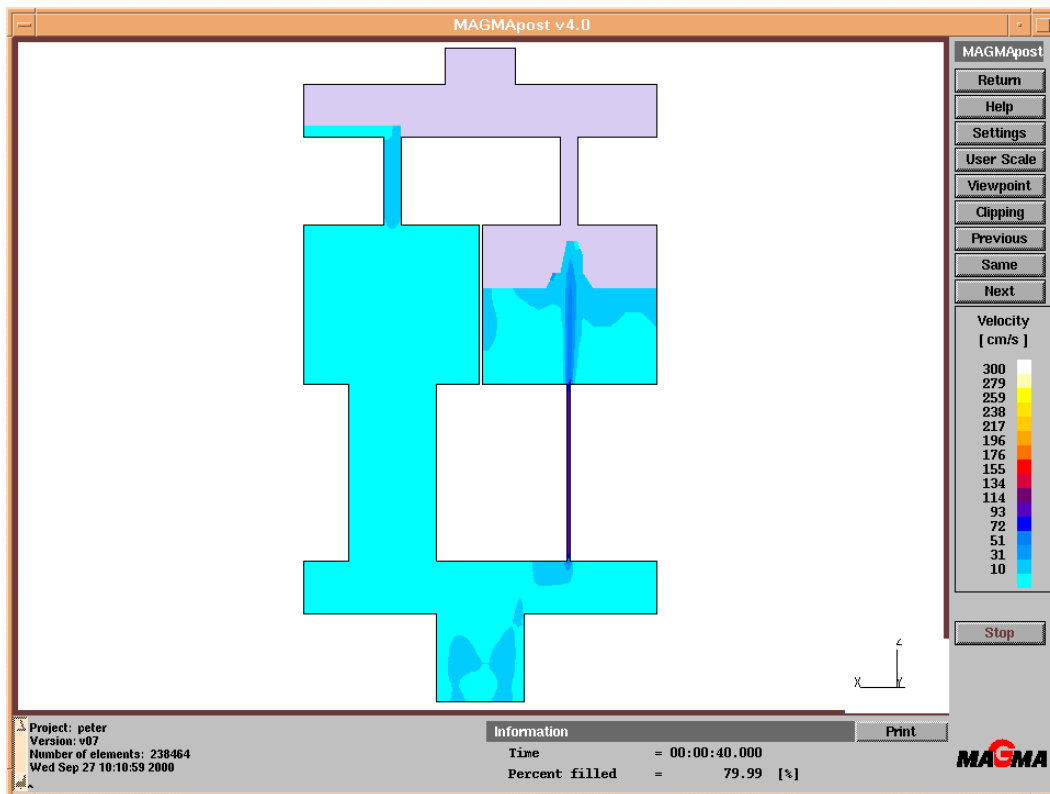


Bild 60: Formfüllung der Testgeometrie (Formfüllzeit $t = 50$ s)

Es ist ersichtlich, daß die Form über den dünnen Querschnitt wesentlich langsamer gefüllt wird als über den größeren Querschnitt. Durch die Vergrößerung der Formfüllzeit kann die Geschwindigkeit in der Form beeinflußt werden. Bei einer Formfüllzeit von einer Sekunde beträgt die Geschwindigkeit im Anschnitt 1,3 bis 1,5 m/s. In den kleineren Querschnitten der Form erreicht die Geschwindigkeit Werte von über 3,0 m/s. Bei einer Formfüllzeit von 10 s sinkt die Geschwindigkeit im Anschnitt auf Werte unter 0,31 m/s. Die Spitzenwerte liegen im kleinsten Querschnitt bei ca. 1,2 m/s. Bei Formfüllzeiten von 30 s und 50 s sinken diese Geschwindigkeiten weiter. Die Formfüllung des rechten Querschnitts erfolgt von oben. Auch bei einer Formfüllzeit von 50 s wird der rechte Querschnitt teilweise über den oberen Querlauf gefüllt.

7.3.1.4. Laborversuch

In einem Laborversuch sollen die Ergebnisse aus der Berechnung mit den Rechnerprogrammen Excel und Magmasoft geprüft werden. Dazu wurde die Testgeometrie mit Plexiglas nachgebildet. Für die Versuche wurde gefärbtes Wasser verwendet. Die Bilder

61 und 62 zeigen den Versuch mit Druckanstiegszeiten von 10 s und 30 s. Die Aufnahmen entstanden bei einer Formfüllung von 70 %.



Bild 61: Formfüllung der Testgeometrie im Laborversuch (Druckanstiegszeit $t = 10$ s)



Bild 62: Formfüllung der Testgeometrie im Laborversuch (Druckanstiegszeit $t = 30$ s)

7.3.1.5. Vergleich der Ergebnisse

Die mit dem Laborversuch gewonnenen Ergebnisse konnten sowohl mit der Tabellenkalkulation als auch mit der Simulationssoftware ermittelt werden. Die mit der Tabellenkalkulation berechneten Geschwindigkeiten und Füllhöhen stellen einen eindimensionalen Verlauf dar. Für eine erste Abschätzung der Verhältnisse in der Form reicht

sie aus. Der Vorteil liegt in der kurzen Berechnungszeit. Ein wesentlicher Nachteil ist, daß die Berechnung nur in einer Dimension erfolgt. Änderungen im Flächeninhalt werden nur insgesamt berücksichtigt. Lokal auftretende Geschwindigkeitsspitzen können somit nicht erfaßt werden. Sie müssen wie in dem Beispiel dargestellt in getrennten Berechnungen ermittelt werden.

Die Berechnung mit der Simulationssoftware erfolgt dreidimensional. Das bedeutet, daß hier lokale Geschwindigkeitsunterschiede ermittelt werden können. Der Vorteil der Simulationssoftware ist in der genauen Berechnung zu sehen, der Nachteil in der langen Berechnungszeit. Die Berechnung dieser Testgeometrie dauerte bei einer Formfüllzeit von 1 s über eine Stunde und erhöhte sich bei den größeren Formfüllzeiten noch.

Von einer gesteuerten Formfüllung kann dann gesprochen werden, wenn die tatsächliche Formfüllhöhe der angelegten Druckhöhe entspricht. In der Tabellenkalkulation wird dieser Unterschied deutlich durch die Abweichung der Variablen h von der Variablen h_{gerade} . Dagegen kann bei der Simulation die Formfüllhöhe direkt abgelesen werden. Lokale Unterschiede weisen auf Abweichungen zu der angelegten Druckhöhe hin. Als Maß für die gesteuerte Formfüllung ist eine gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung zu sehen. Große Geschwindigkeitsdifferenzen auf örtlich eng begrenztem Raum weisen auf starke Turbulenzen hin. Hohe Geschwindigkeiten können wie in Bild 57 ersichtlich auch zu Gaseinschlüssen führen.

Für die Realisierung der gesteuerten Formfüllung beim Niederdruck-Gießverfahren ist es günstig, zuerst die Geschwindigkeitsverhältnisse in der Form mit einem Tabellenkalkulationsprogramm abzuschätzen und den erforderlichen Druckanstieg während der Formfüllung zu ermitteln. Im zweiten Schritt sollen die getroffenen Annahmen mit einem Simulationsprogramm überprüft werden. Dieses Vorgehen spart zum einen Rechenzeit, bringt aber zum anderen die erforderliche Sicherheit bei der Bewertung des Gießvorganges.

7.3.2. Zugstäbe

Die in Bild 48 und Bild 49 dargestellten Probleme beim Niederdruck-Vollform-Gießverfahren sollten mit der Simulationssoftware nachempfunden werden. Dazu wurden die gleichen Gießbedingungen vorgegeben. Der zu erwartende Widerstand des Schaumstoffmodells wurde aber nicht berücksichtigt. In Bild ist die Simulation mit einer Formfüllzeit von einer Sekunde dargestellt. Bei den hier auftretenden Geschwindigkeiten konnten die Fehler nicht nachvollzogen werden.

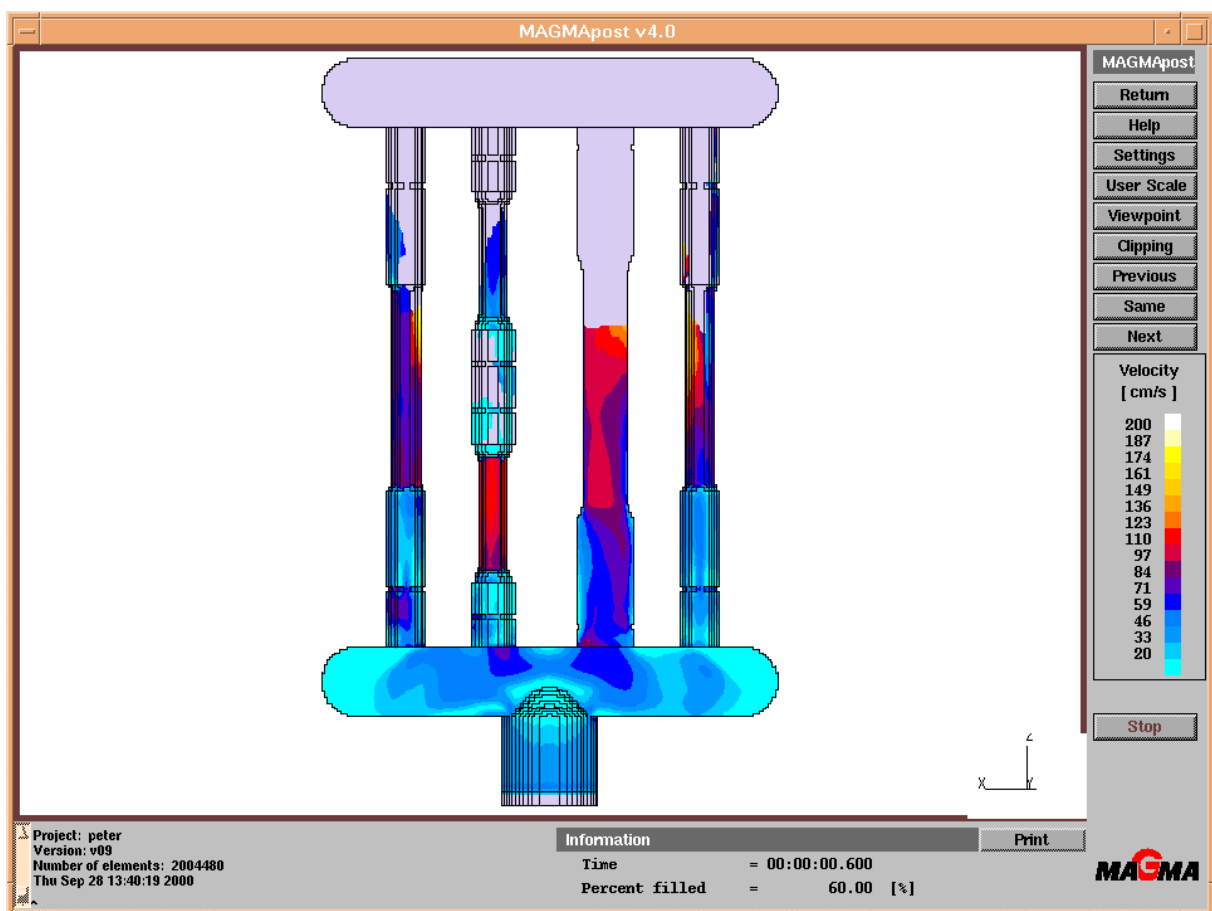


Bild 63: Formfüllung der Zugstäbe (Formfüllzeit $t = 1$ s)

Es ist zu bemerken, daß die Füllhöhe in den Zugstäben bei 60 % der Füllung etwa gleich ist. Die beim Niederdruck-Vollformgießen beobachtete schnellere Füllung der inneren Stäbe und der daraus resultierende Überlauf von oben in die äußeren Stäbe ist hier nicht gegeben.

7.3.3. Gußstück

Für ein reales Gußstück wurde die Berechnung nochmals mit einer Tabellenkalkulation und dem Simulationsprogramm durchgeführt. Die geometrischen Gegebenheiten sind Bild 64 zu entnehmen. Für das Gießen wurde das Gußstück auf die linke hintere Seite gedreht. Die Hauptabmessungen betragen in jeder Richtung ca. 0,4 m. In der Höhe kommt ein Anschnitt von ca. 0,06 m hinzu. Der Anschnittdurchmesser beträgt 0,03 m. Als Gußwerkstoff wurde ein GG 20 mit einer Gießtemperatur von 1450 °C angenommen.

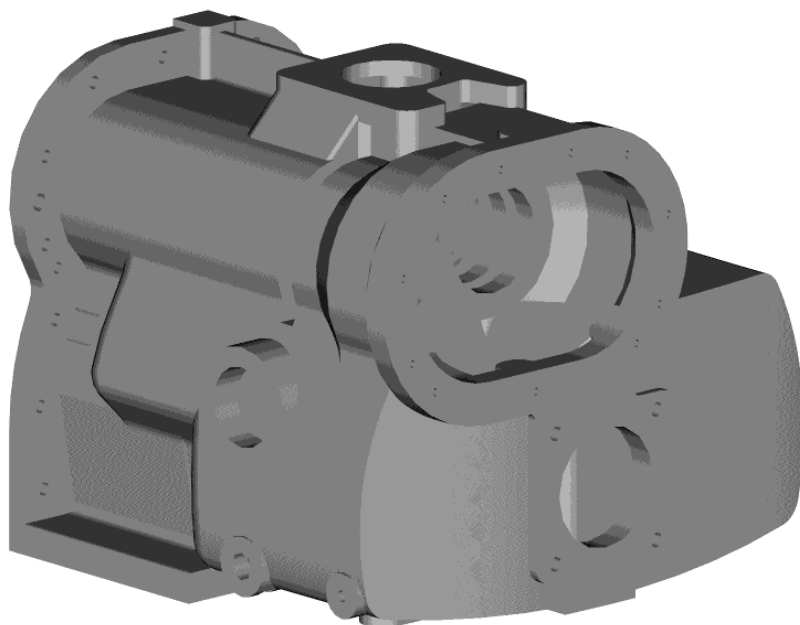


Bild 64: Gußstückgeometrie

In den Bildern 65 und 66 sind die Berechnungen der Formfüllung für die Druckanstiegszeit bzw. die Formfüllzeit von jeweils 5 s dargestellt. Die Berechnungen zeigen eine gute Übereinstimmung in bezug auf die Geschwindigkeiten. Sowohl die Geschwindigkeit im Anschnitt als auch die der Schmelzefront stimmen im wesentlichen überein. Lokale Geschwindigkeitsabweichungen, wie sie in Bild 66 an der rechten Seite der Schmelzefront zu erkennen ist, können mit dem Tabellenkalkulationsprogramm aber nicht dargestellt werden. Die Berechnung dauert für dieses Teil mit der Simulationssoftware ca. einen Tag.

Eine Annäherung der tatsächlichen Formfüllhöhe zur angelegten Druckhöhe ergibt sich erst bei einer Druckanstiegszeit von mehr als 50 s.

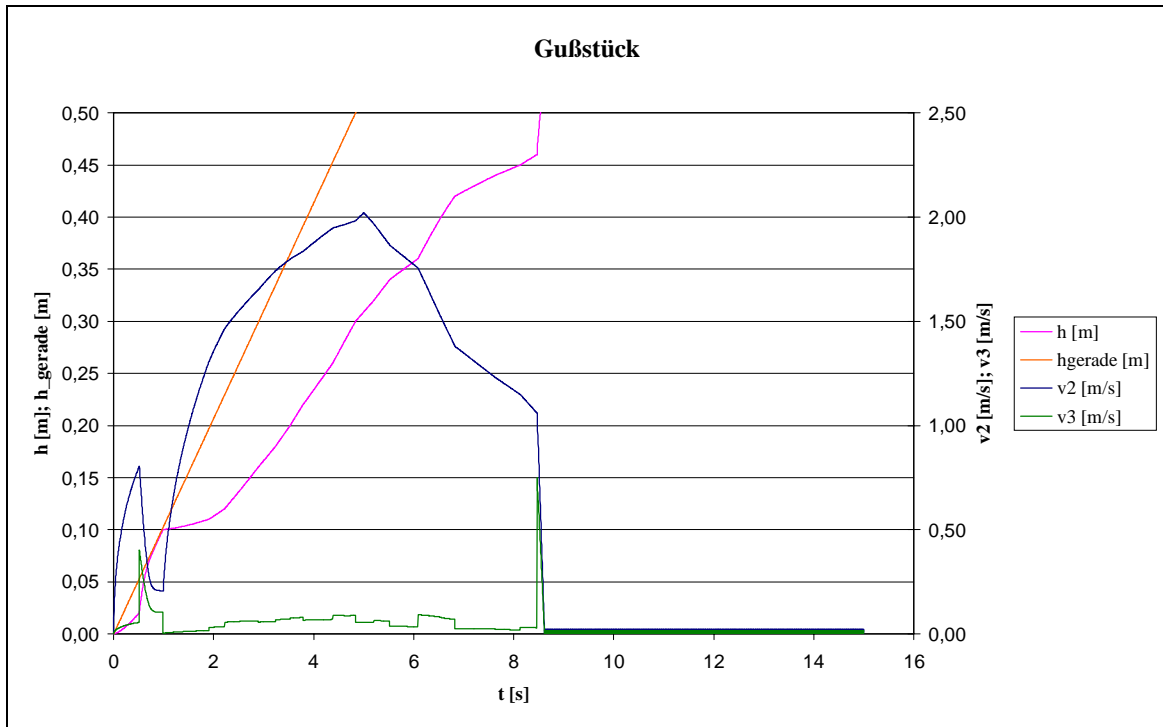


Bild 65: Formfüllung eines realen Gußstücks (Druckanstiegszeit $t = 5$ s)

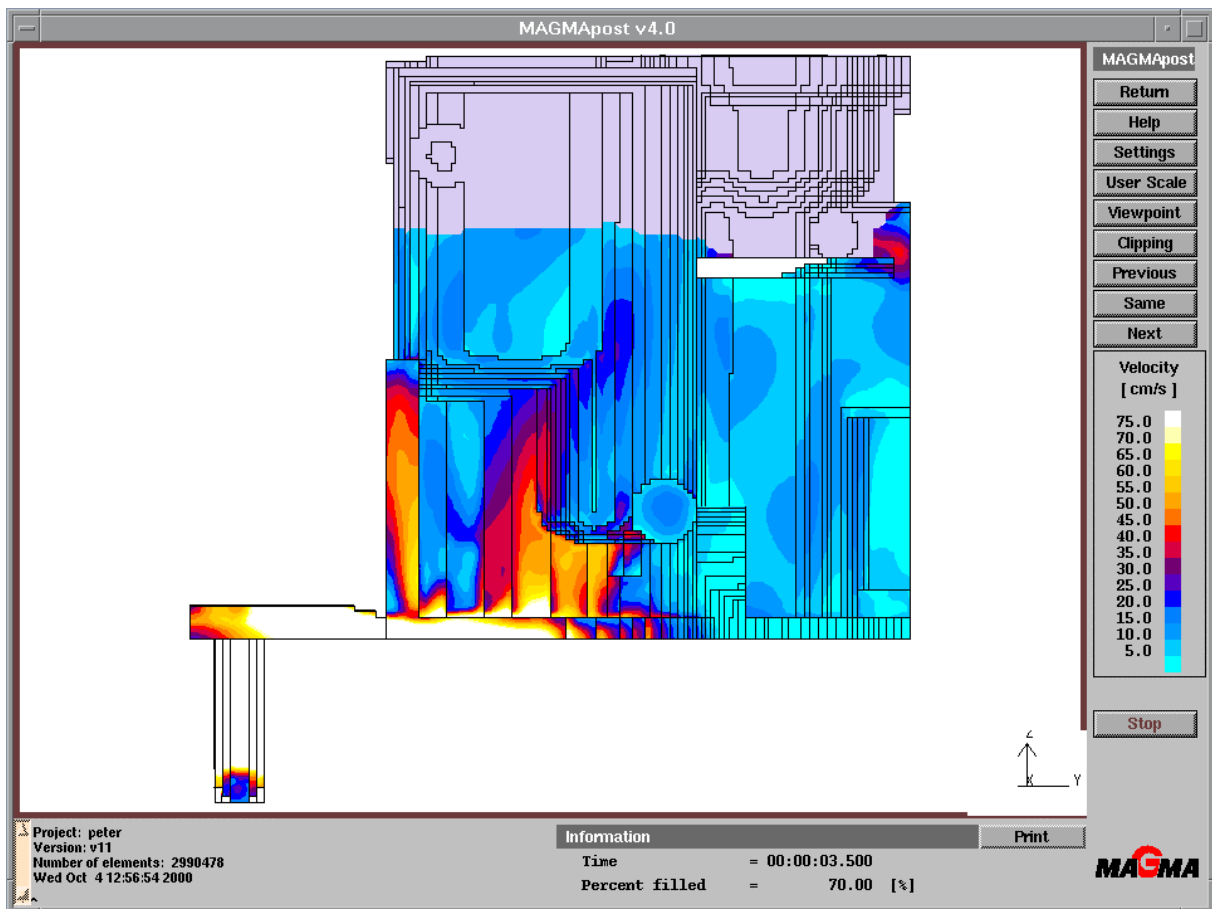


Bild 66: Formfüllung eines realen Gußstücks (Formfüllzeit $t = 5$ s)

8. Zusammenfassung

Das Niederdruck-Gießverfahren ist ein innovatives Gießverfahren. Es ermöglicht die gesteuerte Formfüllung. Durch diese ist es möglich, Gießfehler zu beseitigen oder zu minimieren. Gießfehler, die durch eine unkontrollierte Formfüllung entstehen, sind Einschlüsse von Luft und Formstoffbestandteilen. Durch zu große Geschwindigkeiten der Schmelze können ebenfalls Beschädigungen der Form auftreten. Der Einsatz des Niederdruck-Gießverfahren erfolgt gegenwärtig hauptsächlich für den Werkstoff Aluminium und ist dort Stand der Technik. Durch die Anwendung des Niederdruck-Gießverfahren für Eisen-Kohlenstoff-Legierungen können die Vorteile des Verfahrens auch hier genutzt werden.

Die für das Niederdruck-Gießverfahren bei Aluminium verwendeten Steigrohre sind bei Eisen-Kohlenstoff-Legierungen nicht anwendbar. Hier haben sich Steigrohre aus Quarzglas bewährt. Rohre aus Keramik besitzen in vielen Fällen nicht die notwendige Temperaturwechselfestigkeit. Rohre aus Graphit besitzen die notwendige Temperaturwechselfestigkeit. Sie haben einen hohen Abbrand, der eine Aufkohlung der Eisenschmelze zur Folge hat. Quarzglasrohre können bei der Fertigung der Form in diese integriert werden. Sie sind dann als Einwegrohre zu betrachten, die beim Ausformen zerstört werden. Sie können aber auch als separate Steigrohre verwendet werden. Dadurch sind sie für mehrere Abgüsse einsetzbar. Eine Zerstörung der Rohre wird dadurch verhindert. Die weitere Ausrüstung der Gießeinrichtung entspricht den herkömmlichen Niederdruck-Gießeinrichtungen für Aluminium. Die Erprobung einer solchen Gießeinrichtung erfolgte im Labormaßstab. Sie konnte erfolgreich durchgeführt werden und bestätigt die Eignung von Quarzglasrohren als Steigrohre.

Beim Niederdruck-Gießverfahren wird die Schmelze von unten über das Steigrohr in den Formhohlraum gefördert. Die Höhe der Schmelze im Steigrohr und später im Formhohlraum ist proportional dem angelegten Druck und wird als Druckhöhe bezeichnet. Sie ist während der Formfüllung jedoch eine theoretische Größe, die sich dann einstellt, wenn die Schmelze in Ruhe ist. Die Höhe der Schmelze während der Formfüllung hängt aber auch von den strömungstechnischen Gegebenheiten ab. Auf Grund von Querschnittsänderungen ändert sich auch die Geschwindigkeit der Schmelze. Diese beeinflusst aber die Durchflußmenge und damit die tatsächliche Füllhöhe.

Die gesteuerte Formfüllung ist dann gegeben, wenn die tatsächliche Füllhöhe der angelegten Druckhöhe in engen Grenzen folgt. Das kann dann erreicht werden, wenn die Form langsam gefüllt wird. Bei einer schnellen Formfüllung, das heißt großen Geschwindigkeiten in der Form, wird der Einfluß von Querschnittsänderungen und anderer hydraulischer Widerstände um so größer. Die Größenordnung, in der sich die Druckanstiegszeit bewegen sollte, um eine gesteuerte Formfüllung zu realisieren, läßt sich mit einer Tabellenkalkulation in kurzer Zeit abschätzen. Dabei müssen Vereinfachungen hingenommen werden. Eine genaue Analyse der Formfüllung kann dann mit einem Simulationsprogramm für die abgeschätzten Druckanstiegszeiten durchgeführt werden. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, daß der hohe Zeitaufwand des Simulationsprogramms durch die Kenntnis der Druckanstiegszeit auf wenige Berechnungen reduziert werden kann und die Genauigkeit für diese Zeiten gewährleistet wird. Damit kann das für die gesteuerte Formfüllung notwendige Druckregime ermittelt werden.

9. Ausblick - Die gesteuerte Formfüllung beim Hohlgießverfahren

9.1. Ziel des Hohlgießverfahrens

Mit Hilfe der gesteuerten Formfüllung kann maßgeblich auf die Qualität der Gußstücke Einfluß genommen werden. Ein weiterer Aspekt bei der Gußteilherstellung ist die Erstarrung während und nach der Formfüllung. Zu dieser Problematik wurden einige Versuche durchgeführt, an deren Ende ein patentiertes Verfahren zur Herstellung von Hohlräumen [60] stand. Das Verfahren wird als Hohlgießverfahren bezeichnet. Es läßt sich sehr gut mit dem Niederdruck-Gießverfahren realisieren. Eine gesteuerte Formfüllung kann damit gewährleistet werden.

Ausgangspunkt für die Überlegungen zum Verfahren war, daß mit der Reduzierung der Masse bei Gußstücken eine Energieeinsparung während ihres Gebrauchs einher geht. Insbesondere bei bewegten Serienteilen im Fahrzeugbau ist das von Interesse. Die Verringerung der Gußstückmasse zieht in den meisten Fällen eine Verringerung der Festigkeit nach sich. Die Aufgabe bestand darin, massereduzierte stabilitätsoptimierte Bauteile zu konzipieren und herzustellen. Das kann durch das Einbringen von Hohlräumen in das Gußstück erreicht werden. Im Verlauf der Arbeiten ergab sich eine weitere Möglichkeit für die Anwendung des Verfahrens. So ist es durch das Verfahren möglich, in bestimmten Fällen auf Kerne zu verzichten oder Hohlräume dort einzubringen, wo sie mit Kernen nicht hergestellt werden können.

9.2. Darstellung des Verfahrens

Der Einsatz des Niederdruck-Gießverfahrens und der gesteuerten Formfüllung sind bei der Herstellung von Hohlkörpern nicht zwingend notwendig, bieten aber unübersehbare Vorteile. Das Hohlgießverfahren wird deshalb in Verbindung mit dem Niederdruck-Gießverfahren vorgestellt.

Das Verfahren beruht darauf, daß die Erstarrung des Gußstückes vom Rand nach Innen erfolgt. Es bildet sich während und nach der Formfüllung eine Randschale, welche die äußere Kontur des Gußstücks nachbildet. In Abhängigkeit von der Zeit nimmt die Dicke der Randschale zu. Beim „normalen“ Niederdruck-Gießen wird der Druck noch solange aufrecht erhalten, bis die Schmelze in der Form vollständig erstarrt ist. Im Gegensatz dazu wird beim Hohlgießen der Gießdruck nach Erreichen einer bestimmten Zeit, zu der ein Teil der Schmelze im Gußstück noch flüssig ist, zurückgenommen. Die noch flüssige Schmelze im Gußstück läuft heraus und es bleibt die Randschale stehen. Somit entsteht ein hohles Gußstück (Bild 67).

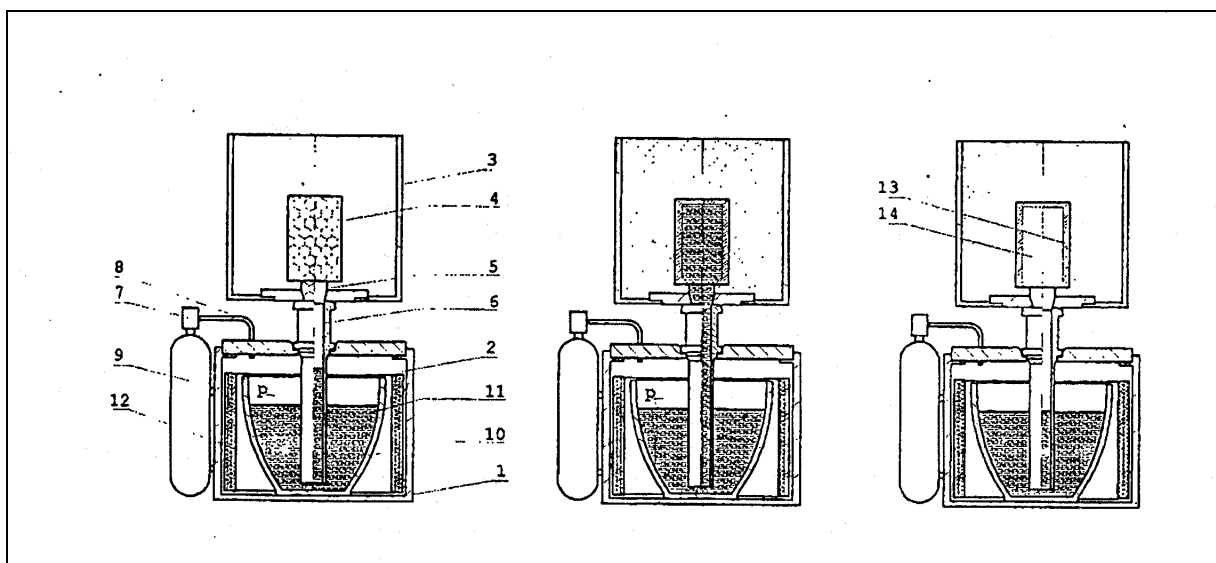


Bild 67: Hohlgießverfahren

9.3. Probleme bei der Herstellung von Hohlkörpern

Während der Formfüllung kommt es zu einem Wärmeverlust der Schmelze. Das heißt, je höher die Schmelze steigt, um so mehr kühlt sie ab. Es entsteht ein Temperaturgefälle, bei

dem die Temperatur im Anschnitt am höchsten ist und in den am weitesten entfernten Bereichen des Gußstücks am niedrigsten. Dadurch differiert der Wärmeinhalt der Schmelze in der Form örtlich. Bereits während der Formfüllung kommt es zur Ausbildung einer Randschicht. Nach erfolgter Formfüllung wächst sie in Abhängigkeit von der Zeit. Durch die unterschiedlichen Temperaturen der Schmelze in der Form ist die Geschwindigkeit, mit der die Randschicht wächst, ebenfalls örtlich verschieden. Eine gleichmäßige Randschale über das ganze Gußstück ist somit nicht möglich. An den „Endzonen“ des Gußstücks wird die Erstarrung immer weiter fortgeschritten sein als am Anschnitt. Durch den Einsatz von mehreren verschiedenen Formstoffen, mit unterschiedlichen thermischen Kennwerten, kann Einfluß auf die Ausbildung der Randschale genommen werden.

9.4. Anwendungsgebiete

9.4.1. Individuelle Prothetik

Die individuelle Prothetik, insbesondere bei Endoprothesen der Röhrenknochen, bietet sich als Anwendungsgebiet für das Hohlgießverfahren an. Die Röhrenknochen sind bereits von der Natur als Hohlkörper ausgebildet. Das natürliche Prinzip lautet hier, mit einem minimalen Aufwand an Masse eine optimale Festigkeit zu erreichen. Dieses Prinzip ist erst recht bei Endoprothesen anzuwenden, um eine übermäßige Belastung des Patienten durch das Gewicht der Endoprothese zu vermeiden. Die Verwendung der originalen Abmessungen des Knochen für die Endoprothese dient einer Verbesserung der Verträglichkeit. Die Dicke der Randschale ist entsprechend der mechanischen Anforderungen in den Knochenbereichen unterschiedlich. Bei einem Oberschenkelknochen ist die Randschalendicke im Bereich des Femurkopfes gering (Bild 68, Bereich 1). Er erhält seine Stabilität durch die Spongiosa, einer sich im Inneren befindlichen schaumartigen Knochensubstanz. Über diese werden die dynamischer Belastungen in den Knochen eingeleitet. Dagegen ist die Randschalendicke im Bereich des Schafts groß (Bild 68, Bereich 2). Hier werden hauptsächlich statische Kräfte aufgenommen.

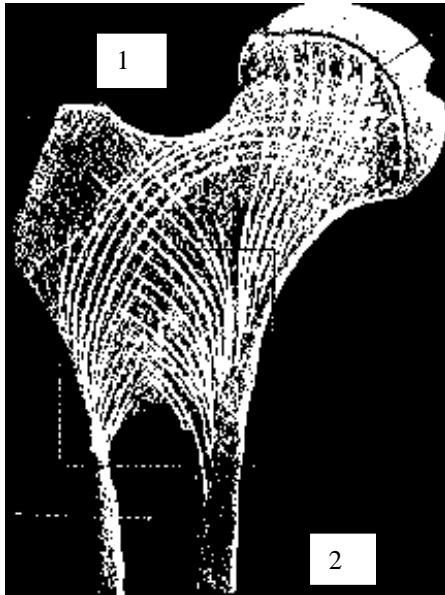


Bild 68: Röntgenographische Aufnahme eines Femurkopfes

Das Vorgehen bei der Herstellung der Endprothese eines Oberschenkelknochens mit Hilfe des Hohlgießverfahrens ist im Folgenden beschrieben. Unter Verwendung eines Computertomographens werden die geometrischen Daten für das Implantat gewonnen. Bild 69 zeigt drei Schichtaufnahmen eines Oberschenkelknochens in verschiedenen Ebenen.

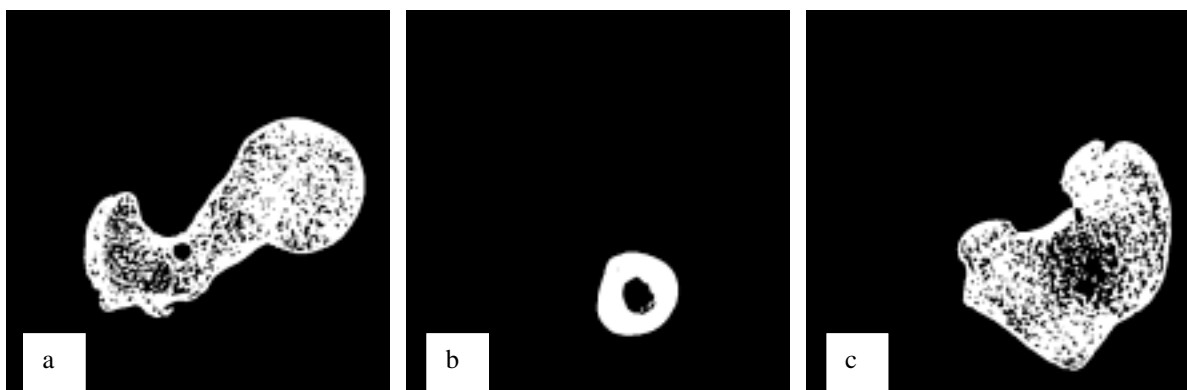


Bild 69: Schichtbilder eines Oberschenkelknochens

In diesen Aufnahmen werden noch einmal die unterschiedlichen Dicken der Randschale in den verschiedenen Ebenen deutlich. Die Genauigkeit hängt von den Einstellungen am Computertomographen ab. Aus den gewonnen Schichtbildern kann durch Konvertierungsprogramme ein 3D-CAD-Modell (Bild 70) erstellt werden. Dieses kann dann am Computer weiter verarbeitet werden.

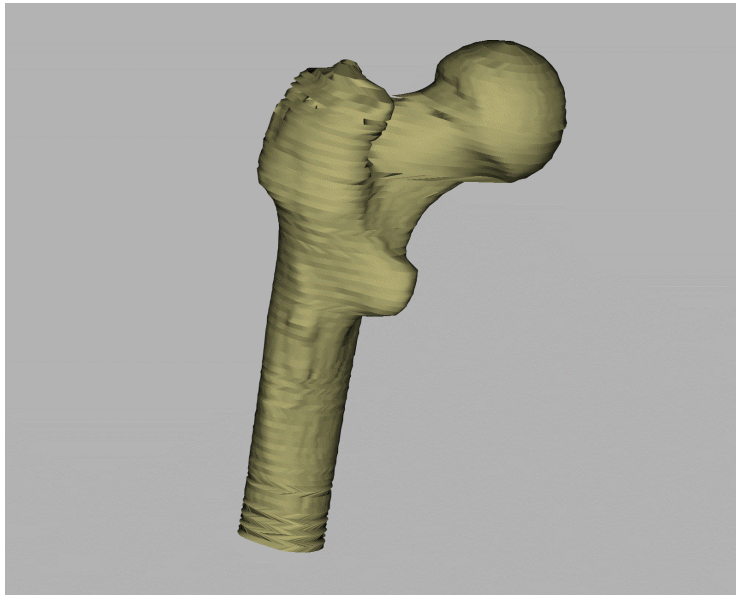


Bild 70: 3D-CAD-Modell eines Oberschenkelknochens

Durch Verfahren des Rapid Prototyping ist es möglich, die Gießform aus den CAD-Daten entsprechend den individuellen Abmessungen herzustellen. Ein solches Verfahren ist beispielsweise das DirectCroneing-Verfahren bei dem die Form durch Lasersintern schichtweise aufgebaut wird.

Diese Form wird beim Hohlgießverfahren verwendet. Mit dem Niederdruck-Gießverfahren wird die Form ruhig, entsprechend der gesteuerten Formfüllung, gefüllt. Von der Oberfläche der Form kühlt die Schmelze zum Inneren hin ab. Es bildet sich die Randschale. Nach Ablauf einer vorher zu bestimmenden Zeit wird der Druck im Gießofen gesenkt und die noch flüssige Schmelze im Inneren des Gußstücks läuft in den Tiegel zurück. Nach dem Gießen wird das Gußstück ausgeformt. Anschließend werden die Eigenschaften der Oberfläche verbessert, um die Verträglichkeit des Implantats zu gewährleisten.

Für Implantate werden als Werkstoff Titan oder auch Chrom-Nickel-Stähle eingesetzt. Während das Niederdruckgießen von Chrom-Nickel-Stählen entsprechend den Versuchen dieser Arbeit möglich ist, bedarf das Niederdruckgießen von Titan noch weiterführender Untersuchungen.

9.4.2. Industrielle Anwendungen

Das Hohlgießverfahren kann auf technischem Gebiet überall dort angewandt werden, wo Masse reduziert werden soll und es auf keine genaue Abbildung der Innenkontur ankommt.

Der Einsatz ist aber auch dort möglich, wo das Arbeiten mit Kernen Schwierigkeiten bereitet. Ein Beispiel dafür sind lange Nockenwellen mit einer Bohrung entlang der Mittelachse (Bild 71). Bei der Herstellung dieser Bohrung kann es beim Gießen durch die unterschiedlichen Dichten des Formstoffs des Kerns und der Schmelze zum Aufschwimmen des Kerns kommen. Der Kern kann dabei brechen oder seine Lage verändern.



Bild 71: Nockenwelle mit Kühlbohrung

Mit dem Hohlgießverfahren kann bei beliebiger äußerer Geometrie und einstellbarer Randschichtdicke die Bohrung durch einfaches Auslaufen der Schmelze erhalten werden. Bild 72 zeigt am Beispiel von Zugstäben, daß unterschiedliche Randschichtdicken erzielt werden können.



Bild 72: Unterschiedliche Randschichtdicken bei Zugstäben

Weitere Anwendungsfälle können Lagerblöcke mit Kühlkanälen sein.

Es ist vorstellbar, daß mit diesem Verfahren auch die Voraussetzungen für Verbundwerkstoffe geschaffen werden. Dies kann dadurch geschehen, daß mit dem Hohlgießverfahren eine dünne Hülle erzeugt wird, die nachfolgend ausgeschäumt wird. Das Ausschäumen kann sowohl mit Polymer- als auch mit Metallschäumen erfolgen. Die daraus resultierenden Werkstücke stellen hervorragende Energieabsorber dar. Als Beispiel für diese Verfahrensweise ist die Stoßstange von Fahrzeugen zu nennen. Dabei muß zuerst mit dem Hohlgießverfahren eine dünne äußere Hülle erzeugt werden. Diese muß fest genug sein, Stöße geringer Intensität elastisch zu ertragen. Das Innere wird beispielsweise mit Aluminium ausgeschäumt. Bei einem Aufprall wird ein Teil der Energie durch die plastische Umformung des Aluminiumschaums aufgenommen. Die Gefahren bei einem Unfall können damit weiter reduziert werden.

10. Vorschläge für weiterführende Arbeiten

1. Prüfung alternativer Steigrohrmaterialien
2. Modellierung der Strömungsvorgänge für das Niederdruckgießen
3. Modellierung der Abkühlvorgänge für das Niederdruckgießen während der Formfüllung
4. Kombination der Strömungs- und Abkühlvorgänge im Modell des Niederdruckgießens
5. Ermittlung strömungstechnischer Werkstoffwerte
6. Ermittlung thermischer Werkstoffwerte
7. Erprobung des Verfahrens unter Praxisbedingungen
8. Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit des Verfahrens
9. Weiterführende Untersuchungen zum Hohlgießverfahren
10. Untersuchungen zum Ausschäumen von Hohlkörpern mit Metallschaum (Aluminium)
11. Festigkeitsuntersuchungen von ausgeschäumten Hohlkörpern

11. Literatur

- [1] Kurtz GmbH: Bedienungsanleitung für die Niederdruck-Gießmaschine, 1994
- [2] Otto Junker GmbH: Schmelz- und Dosieröfen für Magnesium, Werbematerial, 1997
- [3] Röperwerk, Niederdruckgießmaschinen, Werbematerial, 1997
- [4] KWC AG: low pressure die casting technology for brass, <http://www.kwcengineering.ch/>, 2000
- [5] Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau (16.Aufl.), Springer-Verlag, 1987
- [6] Dax, Gundelfinger, Häffner, Itschner, Kotsch, Staniczek: Tabellenbuch für Metalltechnik, Verlag Handwerk und Technik, 1989
- [7] Brunhuber, E.: Gießerei-Lexikon (16.Aufl.), Fachverlag Schiele & Schön GmbH, 1993
- [8] Arndt, A.: Kleines Formellexikon, Verlag Technik, 1986
- [9] Hursen, H.H.: Pressure pouring and graphite permanent molds used in production of steel car wheels, Trans. Amer. Foundrymen's Soc. 63 (1955), p. 367
- [10] Sawidow, M.A., Merkulow, E.A.: Methode zur Herstellung gegossener Elemente in Gießsystemen aus Graphit, Litejnoe Proizvodstvo 10 (1960)
- [11] Sosnenko, M.N.: Gießparameter bei Graphit - Dauerformen, Litejnoe Proizvodstvo 2 (1960), S. 34
- [12] Antes, H.: Starch content effect on a rammed graphite mold material for casting titanium, Trans-American Foundrymen's Society 67 (1959), p. 166
- [13] Wlodawer, R.: Gelenkte Erstarrung von Gusseisen, Gießerei Verlag, 1977
- [14] Wlodawer, R.: Gelenkte Erstarrung von Stahlguß (2.Aufl.), Gießerei Verlag, 1992
- [15] Plume, A.W.: Design and Development of Low Pressure Die Processes, BCIRA international Conference, 1995, Nr. 24
- [16] Queneau, A.L.J.: Foundry Trade Journal, 1910
- [17] Lang, L.: Entwicklung und Erprobung einer Niederdruck-Vollform-Gießeinrichtung und Verfahrensuntersuchungen, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 1999
- [18] Clegg, A. J.: Precision Casting Processes, Pergamon Press GmbH, 1991
- [19] D-Patent DE 19807623: Niederdruck-Gießverfahren für Leichtmetalle, insbesondere Aluminium, 1999
- [20] D-Patent DE 19821419: Verfahren zum steigenden Niederdruck-Gießen von Metall, insbesondere Leichtmetallen, 1999

- [21] Scheer, R.: Ideen brachten Aufschwung, <http://www.div-blickpunkt.de/BW10-99/blick-6.htm>, 1999
- [22] Heinrich Wagner Sinto Maschinenfabrik GmbH: Der GIFA-Knüller - Eisen-Niederdruck-Guss in Nassguss-Sandformen, GIFA'99 Firmenschrift, 1999
- [23] Aktuelles aus der Industrie, Giesserei-Erfahrungsaustausch, April 1999
- [24] KS Aluminium Technologie AG: Niederdruckguss-Zylinderkurbelgehäuse aus Aluminium, www.kolbenschmidt.de, 2000
- [25] Bertram, E.: Das Niederdruck-Kokillengießverfahren für Leichtmetalllegierungen, Gießerei 49 (1962), Nr. 12, S. 332
- [26] Watanabe, M, Goto, S., Takahashi, T.: Herstellung von Aluminium-Zylinderköpfen nach dem Niederdruck-Kokillengießverfahren, Gießerei 61 (1974), Nr. 3, S. 58
- [27] CSIRO: New technology applies to low pressure die casting, <http://www.techedition.ch/virtu/csiro-casting.html>, 2000
- [28] Soosai M.M., Sundarajan, S.: Problems in development of pressure vessel castings by low pressure die casting process, IIF Transactions, 1995, S.175
- [29] D-Patent DE 19845389: Vorrichtung zum steigenden Niederdruck-Gießen von Metallschmelzen, 1999
- [30] D-Patent DE 19843285: Vorrichtung zum steigenden Niederdruck-Gießen von Metallen, insbesondere Leichtmetallen, 1999
- [31] Roll, F.: Handbuch der Gießerei-Technik (2.Band), Springer-Verlag, 1963
- [32] Spur, G.: Handbuch der Fertigungstechnik (Bd. 1), Carl Hanser Verlag, 1981
- [33] US-Patent US05725043: Low pressure casting process and apparatus, 1998
- [34] US-Patent US05396946: Low pressure casting machine, 1995
- [35] US-Patent US04252173: Low pressure moulding process and apparatus, 1981
- [36] Shroyer, H. F.: Cavityless Casting Mold and Method of making same, US-Patent Office Nr.:2 830 343, 1958
- [37] Parker, A. S.: Designing for Lost Foam. Foundry Management & Technology Nr. 4 (1995) S. 30
- [38] Standke, W.: Serienfertigung nach dem Vollformgießverfahren mit Schaumstoffmodellen, Gießerei 74 (1987), Nr. 1, S. 4 – 12; Nr. 4, S. 84
- [39] Stork, A.: Formfüllmechanismen beim Lost-Foam-Gießen, Dissertation, TU Clausthal, 1999

- [40] Bast, J., Hopf, W., Lang, L., Lippek, P.: unveröffentlichter Bericht im Verbundvorhaben Lost Foam, 1997
- [41] Bast: Niederdruck- Vollformgießen Teilprojekt des Verbundvorhabens: Lost Foam Gießen, www.smwk.de/forschung/ergebnisse/hs_32.html,
- [42] Hofmann, R.: DBP 1 301 439 vom 11. Nov. 1968
- [43] Krzyzanowski, E.: DBP 1 758 521 vom 19. Jan. 1968, DBP 1 301 440 vom 03. Febr. 1968
- [44] Hopf, W., Bast, J., Radoev, B.: Modellierung der Formfüllung beim Vollformgießen, Teil 1, Giessereiforschung 51 (1999), Nr. 4, S. 145
- [45] Hopf, W.: Modellierung der Formfüllung beim Vollformgießverfahren, Habilitationsschrift, TU Bergakademie Freiberg, 2000
- [46] HTM Reetz GmbH: Produktinformation, 1999
- [47] DO-Therm Isolierwerkstoffe: Produktinformation, 1996
- [48] Gossler Thermal Ceramics GmbH: Produktinformation, 1996
- [49] Kapyrok: Produktinformation, 1996
- [50] duotherm Isoliersysteme GmbH: Produktinformation, 1996
- [51] Morgan GmbH: Produktionformation, 1996
- [52] Neumann, R., Fries, R.: Moderne Feuerfest- Technologie für Warmhalte-, Speicher- und Vergießöfen in Eisengießereien, Stahl und Eisen Spezial, Oktober 1995
- [53] SHM Hochleistungskeramik Dr.-Ing. Michael Böhmer, Produktinformation, 1996
- [54] Hopf, W., Bast, J., Lippek, P., Lang, L., Kuhlitz, C.: Modellierung der Formfüllung beim Vollformgießen, Teil 2, Giessereiforschung 52 (2000), Nr. 2, S. 61
- [55] Markus Schmid's Homepage: Beispiele aus der Strömungssimulation, <http://www.arge-metallguss.de/arge/Main/Allg/Schmid/Markus-D.html>, 2000
- [56] Novacast: NovaFlow & Solid™, <http://www.novacast.se/>, 2000
- [57] Magma: MAGMASOFT®, MAGMAiron, MAGMAsteel, <http://www.magmasoft.de/>, 2000
- [58] Flow Science Inc.: FLOW-3D, <http://www.flow3d.com/>, 2000
- [59] Quested, P.N.: High temperature measurement of physical properties for casting simulation, 64. Gießerei-Weltkongreß ,GB 44, 2000
- [60] Bast, J.; Hopf, W.; Lang, L.; Lippek, P.: Deutsche Patentanmeldung „Hohlgießverfahren“ Az.: 196 53 668.5, 1996

