

Conference Teresin

Investigation on plunger and shot-sleeve for a better casting process.

Schmelzmetall Deutschland GmbH

Jürgen Barz

Zielsetzung

Ziel des Projektes war eine Untersuchung, mittels numerischer Simulation, der Temperaturverteilung und der thermisch bedingten Deformation des Gießkolbens und der Gießkammer während eines Gießzyklus. Es sollte der Einfluss der Gießkolbenkonstruktion, des Durchmessers, sowie der Gießbedingungen untersucht werden. Bei den Gießbedingungen sollten insbesondere die Auswirkung des Kammerfüllgrades, der Kammertemperierung und der Temperatur des Maschinenschildes, bzw. des Formrahmens im Einbaubereich der Kammer berücksichtigt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollten zur Optimierung der Gießkolbenkonstruktion, und zur Verbesserung des Kolben-Kammer-Zusammenspiels, und damit auch zur Verlängerung der Standzeit der Gießkolben und Gießkammern beitragen. Die Arbeiten zur numerischen Simulation wurden an der Arbeitsgemeinschaft Metallguss, Aalen, ausgeführt.

Im Anschluss an dieses Projekt wurden aufgrund der enormen Anforderungen bei Strukturteilen auch der Werkstoff- und die Nitrierung der Gießkammer betrachtet. Dies immer mit dem Ziel die Lebensdauer und somit die Performance von Gießkolben und Gießkammer zu optimieren.

Gießkolben- und Gießkammer

Die eigentlichen Gründe für die Verwendung von Kupferlegierungen wie Hovadur® CNCS oder CCNB für Kolben anstelle von Stahl, sind sowohl in der Reduzierung der Zykluszeit wie in der Erhöhung der Standzeit der Füllkammer zu sehen. Letztlich sind diese ein Beitrag zur Steigerung der Produktivität und Kostensenkung.

Um die Zykluszeit zu reduzieren muss die Wärmeenergie dem schmelzflüssigen Metall im Bereich des Anschnitts und dem Pressrest so schnell wie möglich entzogen werden. Der Wärmetransport Q erfolgt dabei gemäß der Gleichung:

$$Q = \Delta T * \lambda * A / s$$

Die einzige wirklich beeinflussbare Größe ist λ , die Wärmeleitfähigkeit des gewählten Werkstoffes für den Druckguss - Kolben. Die Lebensdauer der Komponenten Gießkolben und Gießkammer hängen ganz wesentlich von dem richtigen Kolben-Kammer-Spiel ab, sowie von der Kondition der Gießkammer und der verwendeten Aluminium-Legierung. Zudem ist das Kolben-Kammer-Spiel ein wesentlicher Erfolgsfaktor bei Vakuumguss.

Um eine Basis für die Optimierung des Kolben-Kammer-Spiels zu gewinnen wurden die für die numerischen Berechnungen benötigten 3D CAD-Modelle der Gießkolben und der Gießkammer an Hand von 2D Zeichnungen erstellt.

Stoffwerte

Die, für die numerische Modellierung relevanten, Komponenten der untersuchten Systeme bestanden aus den folgenden Werkstoffen.

- Kupferlegierung Hovadur CNCS (Gießkolbenbuchse)
- Stahl 1.4122 (Gießkolbenstange)
- Warmarbeitsstahl 1.2343 (Gießkammer, Druckgießform, Maschinenschild)
- Gusslegierung AlSi9 (Gießmetall)

Nachfolgend sind die, in den Berechnungen benutzten, thermophysikalischen Stoffdaten dieser Werkstoffe dargestellt.

Hovadur® CNCS

T (°C)	25	30	90	100	150	210	270	330	390	400
λ (W/mK)		197	208		218	227	236	245	252	
c_p (J/gK)				0,41372	0,41698	0,41912	0,42361	0,429	0,43504	0,4361
ρ (g/cm ³)	8,7992	8,7981	8,7755	8,7708	8,7451	8,7173	8,6895	8,6604	8,6314	8,6265

E-Modul (MPa) 140 000
 Ausdehnungskoeffizient (10⁻⁶/K) 16,2 (Mittelwert 20 °C – 300 °C)
 Poisson-Zahl 0,34

Warmarbeitsstahl 1.2343 (X38CrMoV5-1)

Temperatur (°C)	E-Modul (MPa)	Ausdehnungskoeffizient (10 ⁻⁶ /K)
20	215600	
100	211200	9,8
200		12,5
300	198800	13,0
400	192200	13,2
500	184200	13,5
600	173600	13,7

Wärmeleitfähigkeit (W/mK) 28
 Spezifische Wärmekapazität (J/kgK) 460
 Dichte (kg/m³) 7800
 Poisson-Zahl 0,285

Druckgusslegierung AlSi9

Solidustemperatur (°C) 534
 Liquidustemperatur (°C) 595
 Schmelzwärme (kJ/kg) 463,1
 Dichte flüssig (kg/m³) 2450
 Dichte fest (kg/m³) 2700

T (°C)	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	spez. Wärmekapazität (J/kgK)
25	151	
100	155	892
200	163	
300	168	
350		1070
534	168	1234
595	100	1100

Gießprozessparameter

Nachfolgend sind die vorgegebenen, für die numerische Modellierung relevanten, Gießprozessparameter dargestellt.

Gießkolben und Gießkammer mit Durchmesser 160 mm

Ablauf des Gießzyklus (vereinfacht)

Vorgang	Dauer (s)
Dosierung insgesamt	13,3
1. und 2. Phase	3
Kühlzeit	28
Gießzyklus insgesamt	128,8

Weitere Prozessdaten:

Temperatur der Schmelze	680 °C
Gießkammertemperierung	keine Temperierung
Gießkolbenkühlung	Wasser, Vorlauftemperatur 25 °C, 20 l/min
Form- / Maschinenschildtemperatur im Einbaubereich der Gießkammer	64 °C / 47 °C

Numerische Modellierung mit der Finite-Elemente-Methode

Idealisierung der Geometrie, Berücksichtigung der Symmetrie

Die Zahl der zur Abbildung des Rechenggebietes erforderlichen Elemente, und damit die Größe des zu lösenden Gleichungssystems, können sehr groß werden, wenn das Rechenggebiet kleine geometrische Details enthält. Man versucht deshalb die Problemgeometrie so weit wie möglich zu vereinfachen, indem kleine, und für die Lösung irrelevante Details, wie Verrundungsradien, Gewinde, kleine Bohrungen, etc. unterdrückt werden.

Im vorliegenden Fall wurde angenommen, dass sowohl die Geometrie der Gießkolben und der Gießkammern, als auch die Randbedingungen, spiegelsymmetrisch sind. Es musste also nur jeweils eine Hälfte der Gießkammer oder des Kolbens modelliert werden. Des Weiteren wurden die Kolbenstange und der Kolbenträger nicht explizit modelliert. Deren Einfluss wurde stattdessen über Randbedingungen näherungsweise berücksichtigt. Bei den Gießkammern wurden die runden Temperierbohrungen als Kanäle mit quadratischem Querschnitt modelliert.

Vernetzung und Randbedingungen

Bei allen Berechnungen wurden zur Problemdiskretisierung lineare Tetraederelemente verwendet. Die Elementgröße wurde jeweils so gewählt, dass die gesuchten Funktionen (Temperaturverteilung, Verschiebungen) hinreichend genau approximiert werden können. Dies wurde durch einen Vergleich von mehreren, mit unterschiedlichen Vernetzungen berechneten, Lösungen verifiziert. Die Vernetzung der Kolben und Gießkammern ist in den

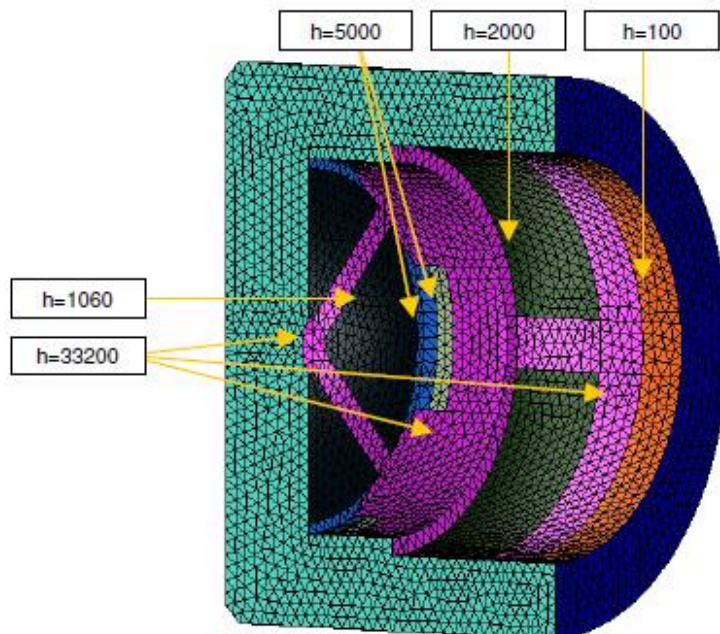
folgenden Bildern dargestellt. Bei den Gießkammern können, auf Grund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Warmarbeitsstahls, an der Kontaktfläche Kammer/Schmelze hohe Temperaturgradienten auftreten. Um sie darstellen zu können ist die Elemententeilung dort verfeinert worden. Dargestellt in den Bildern sind auch die Wärmeübergangszahlen, h , an den einzelnen Innenflächen der Gießkolben. Sie bestimmen den Wärmefluss zwischen Kolben und Kühlwasser, nach der Beziehung $q = h(T - T_0)$ (q – Wärmestromdichte, T_0 – Wassertemperatur).

Vereinfachungen bei der Modellierung des Gießprozesses

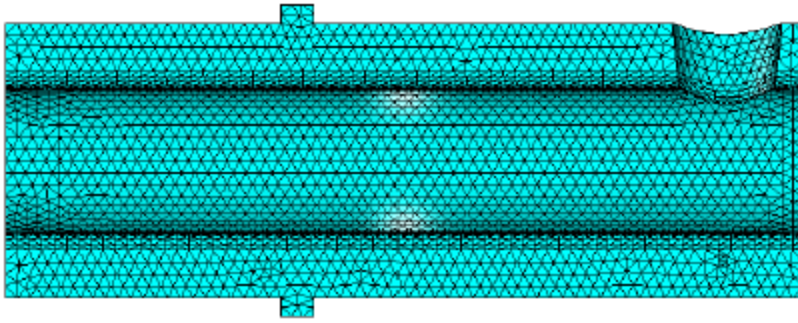
Eine detaillierte und gekoppelte Modellierung der relevanten Vorgänge im System Gießkammer-Gießkolben-Maschine-Schmelze, d. h. der Gießmetallströmung, der Gießkolbenbewegung, des Wärmetransports inkl. Erstarrung, sowie der thermisch bedingten Deformationen, würde weit über den Projektrahmen hinausgehen, und wäre auch mit der fortgeschrittensten Software eine Herausforderung.

Deshalb sind die Vorgänge folgenderweise idealisiert worden.

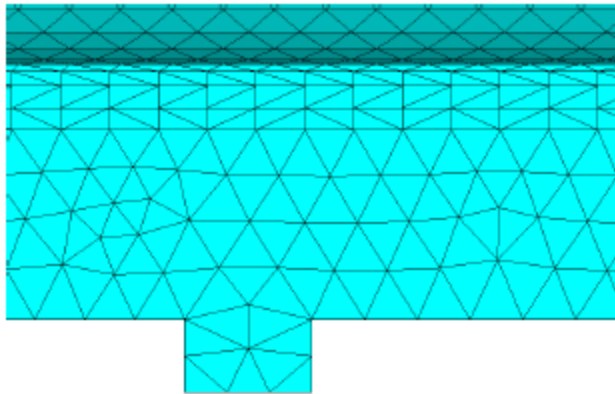
- Der vorgegebene Endfüllgrad der Gießkammer wird momentan erreicht, und bleibt bis zum Ende des Dosiervorgangs konstant
- Die Strömung der Schmelze wird nicht explizit modelliert, sie beeinflusst aber den Wärmeübergang zur Gießkammer und zum Kolben, s. oben
- Nach der Dosierphase verlagern sich die Schmelze und der Gießkolben momentan in den Pressrestbereich
- Die Gießkolbenstirnfläche wird während des Dosiervorgangs zu 50% benetzt, danach zu 100% bis zum Ende der Kühlphase
- Nach der Kühlphase verlagert sich der Gießkolben momentan in die Anfangsposition vor der Einfüllöffnung



Kolben-Adapter-System, $D=160\text{mm}$, Elemententeilung und Wärmeübergangszahlen ($\text{W/m}^2\text{K}$) an den Innenflächen



Gießkammer D=160mm, Elementeinteilung



Detailansicht - Netzverfeinerung an der Innenwand der Gießkammer, D=160mm

Ergebnisse

Gießkolben

Temperaturverteilung während eines Gießzyklus

Die berechnete Temperaturverteilung in den einzelnen Gießkolben, nach Erreichen des thermischen Gleichgewichts, ist in den folgenden Bildern für vier charakteristische Zeitpunkte eines Gießzyklus dargestellt. Die Zeitpunkte sind:

- vor Beginn des Dosiervorgangs
- Ende der Dosierphase/Anfang der 1. Phase
- Ende der 2. Phase/Anfang der Kühlphase
- Ende der Kühlphase.
-

Das thermische Gleichgewicht, d. h. ein zyklisches Temperaturfeld von Abguss zu Abguss, wird bei dem Kolben-Adapter-System bereits nach einem Gießzyklus erreicht, und bei den übrigen Kolben nach 2 bis 3 Gießzyklen.

Die Temperatur der Kolbenstirnfläche vor Beginn des Dosiervorgangs, auf den Bildern markiert, variiert nur geringfügig über der Stirnfläche. Die Variation beträgt ca. 1-2 K bei dem Kolben-Adapter-System, und ca. 5-10 K bei den Standard-Kolben. Bei den Kolben mit 160mm Durchmesser ist die Variation höher als bei den 90mm-Kolben. Beim Wettbewerb-Kolben beträgt die Temperaturvariation in der Laufbuchse ca. 1 K, und im Grundkörper ca. 25 K. Dies hängt mit der niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Grundkörperwerkstoffes (Stahl) zusammen. Während eines Gießzyklus bleiben die wesentlichen Temperaturänderungen auf eine relativ dünne Schicht an der Kolbenstirnfläche beschränkt. Bei den Standardkolben ist die Dicke dieser Schicht größer.

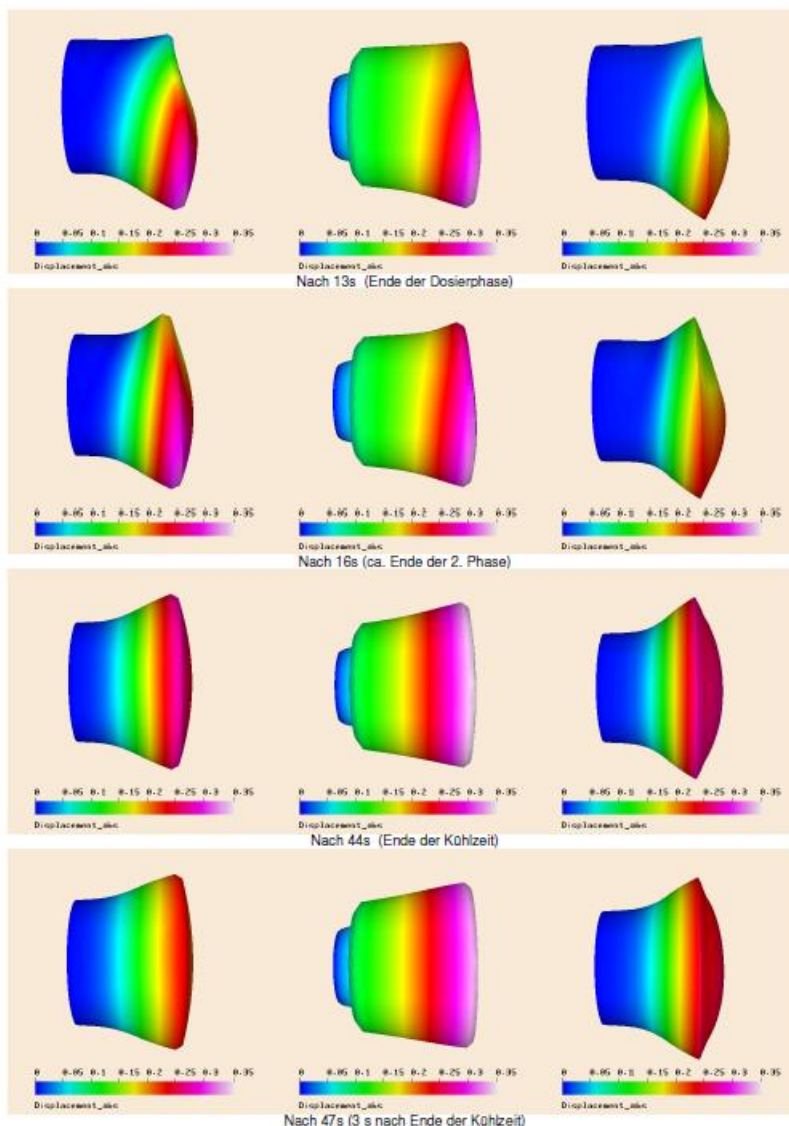
Während der Dosierphase ist die Temperatur an der Kolbenstirnfläche im unteren, von der Schmelze benetzten Bereich, wesentlich höher als im oberen Bereich. Während der Kühlphase gleichen sich diese Temperaturunterschiede weitgehend aus. Im Grundkörper des Wettbewerb-Kolbens besteht jedoch vor Beginn des Dosiervorgangs ein deutlicher Temperaturunterschied zwischen beiden Bereichen.

Thermische Ausdehnung

Die Deformation der Kolben während eines Gießzyklus auf Grund der thermischen Ausdehnung der Werkstoffe ist in den folgenden Bildern dargestellt. Die geometrische Darstellung ist *nur qualitativ und stark überzeichnet*. Mit der Farbskala wird der Betrag der Gesamtverschiebung dargestellt. Die Verschiebungen beziehen sich auf den nicht deformierten Zustand bei einer *Referenztemperatur von 30 °C*.

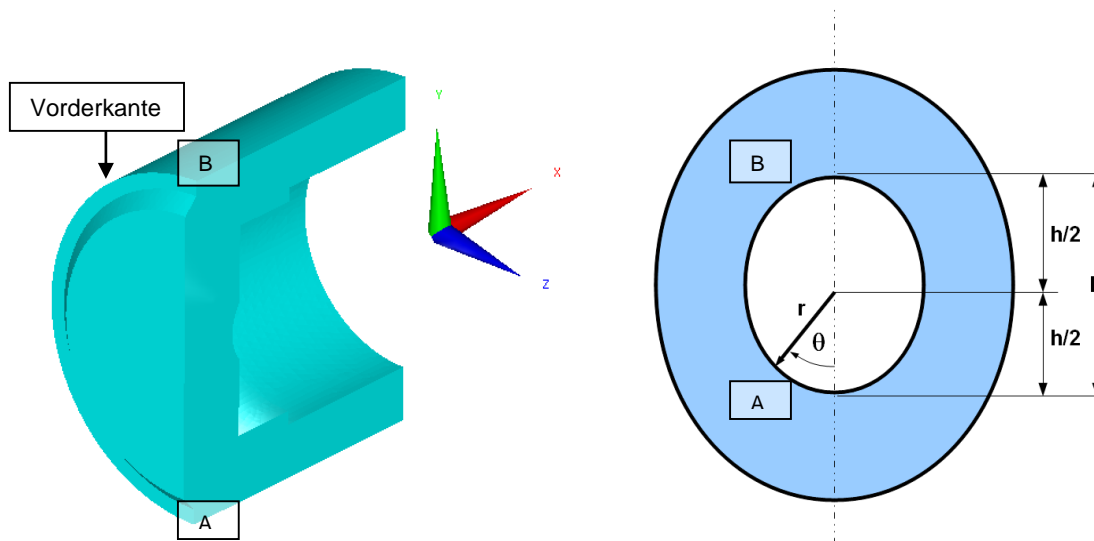
Die Gesamtverschiebung im Bereich der Kolbenstirnfläche widerspiegelt im Wesentlichen die jeweilige Temperaturverteilung. Erkennbar sind insbesondere die unterschiedliche Ausdehnung des unteren und oberen Kolbenbereiches während der Dosierphase, sowie die nahezu rotationssymmetrische Gestalt der Stirnfläche nach der Kühlphase.

Simulation der Temperaturverteilung und der thermisch bedingten Deformation in Gießkolben und Gießkammern



Links: Kolben-Adapter-System, Mitte: Standard-Kolben, Rechts: Wettbewerbs-Kolben

Für das Kammer-Kolben- Zusammenspiel ist die Radius- bzw. Durchmesseränderung des Kolbens an der Vorderkante (s. Bild unten) von Bedeutung. Um die Radiusänderungen der Kolben und Gießkammern aus den Ergebnisdaten der Simulationen zu berechnen ist ein spezielles Programm entwickelt worden. Der Radius, bzw. die Radiusänderung sind wie folgt definiert, s. Bild unten. Der Mittelpunkt des deformierten Kolben- oder Kammerquerschnittes befindet sich in der Mitte zwischen den Punkten A (unterster Randpunkt) und B (oberster Randpunkt). Der Abstand zwischen Mittelpunkt und Querschnitttrand ist der Radius, $r = r(\theta)$. Er ist abhängig vom Winkel θ . Es gilt $r(0^\circ) = r(180^\circ)$.

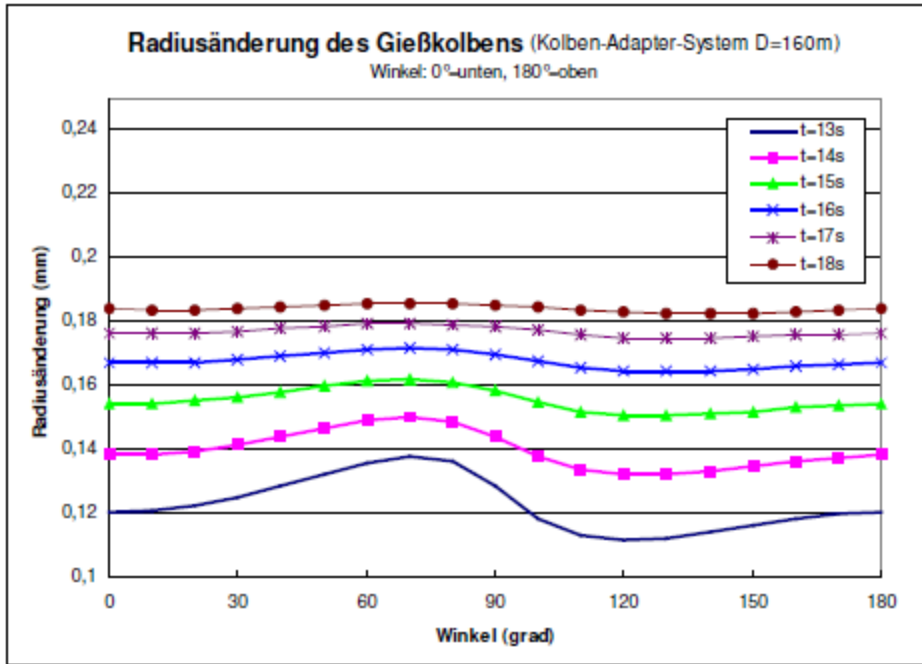


Lage der Gießkolbenvorderkante; Orientierung des Koordinatensystems; Definition des winkelabhängigen Radius (gilt für Gießkolben und Gießkammern)

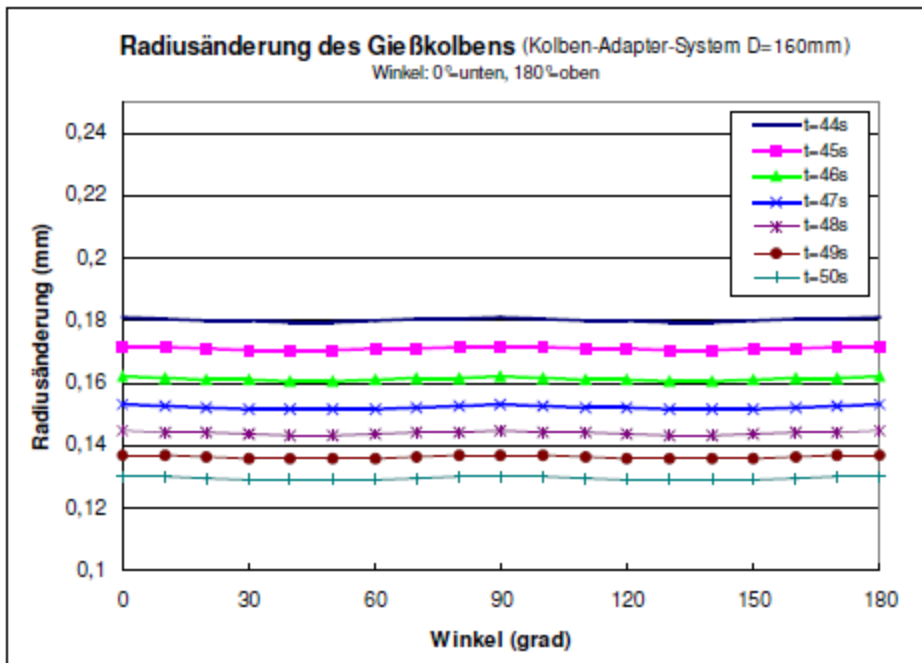
In den folgenden Diagrammen ist, für die einzelnen Gießkolben, die Abhängigkeit des Vorderkantenradius vom Winkel, $r = r(\theta)$, dargestellt. Ausgewertet wurde jeweils der Zustand in mehreren Zeitpunkten nach der Dosierphase und nach der Kühlphase. In diesen Zeitabschnitten finden Kolbenbewegungen statt.

Unmittelbar nach der Dosierphase (13s bei $D=160\text{mm}$) ist die Ausdehnung unsymmetrisch, der Radius hat ein deutliches Maximum bei ca. 70° und ein Minimum bei ca. 120° . Nach der vollständigen Benetzung der Kolbenstirn geht diese Asymmetrie zurück, wobei sich der Radius zunächst vergrößert, um dann, mit fortschreitender Abkühlung der Schmelze, wieder zu sinken. Nach der Kühlphase ist die Vorderkante bei allen betrachteten Kolben nahezu kreisrund.

Stellvertretend für die gesamten Auswertungen ist in den folgenden Darstellungen die Deformation des Kolbens des Kolben-Adapter-Systems der Schmelzmetall Deutschland dargelegt.



Nach der Dosierphase (13 s – 18 s)



Nach der Kühlphase (44 s – 50 s)

Sowohl der Standard-Kolben (Kupfer-Kolben nach Kundenzeichnung) wie auch der Wettbewerbs-Kolben zeigten deutlich größere Ausdehnungen, auf den Durchmesser des Kolbens bezogen lagen die Werte um mehr als 0,2 mm höher.

Gießkammern

Für die Gießkammer sind die Temperaturverteilung und die Deformation auf Grund der thermischen Ausdehnung für jeweils die folgenden Fälle berechnet worden.

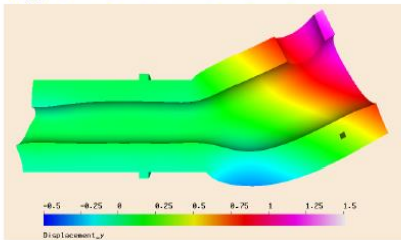
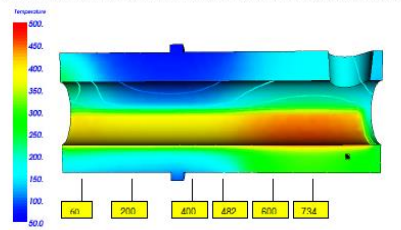
1. Gießkammerdurchmesser $D=160\text{mm}$; Form- / Maschinenschildtemperatur im Einbaubereich der Gießkammer $64\text{ °C} / 47\text{ °C}$
 - 2.1 Gießkammer nicht temperiert
 - 2.1.1 Füllgrad 30 %
 - 2.1.2 Füllgrad 50 %
 - 2.2 Gießkammer temperiert mit Öl, 130 °C
 - 2.2.1 Füllgrad 30 %
 - 2.2.2 Füllgrad 50 %
2. Gießkammerdurchmesser $D=160\text{mm}$; Form- / Maschinenschildtemperatur im Einbaubereich der Gießkammer 200 °C ; Füllgrad 50 %
 - 3.1 Gießkammer nicht temperiert
 - 3.2 Gießkammer temperiert mit Öl, 180 °C

Die Berechnungen wurden für den Zustand des thermischen Gleichgewichts, wenn das Temperaturfeld von Abguss zu Abguss gleich ist, durchgeführt. Dazu war es jeweils erforderlich, zuerst die Temperaturverteilung für ca. 15 aufeinander folgende Gießzyklen zu berechnen. Aus den Ergebnisdaten der Simulationen wurde, wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, der Radius der Kammerinnenfläche, $r=r(\theta)$, für unterschiedliche Abstände vom formseitigen Kammerende berechnet. Betrachtet wurden jeweils zwei charakteristische Zeitpunkte während eines Gießzyklus – das Ende der Dosierphase und das Ende der Kühlphase. Zu diesen Zeitpunkten beginnt die Gießkolbenbewegung. Während der, nur wenige Sekunden dauernden, Kolbenbewegung ändert sich die Kammertemperatur nur in einer dünnen Schicht an der Innenwand, da die Wärmeleitfähigkeit des Kammerwerkstoffes (Stahl 1.2343) niedrig ist. Aus diesem Grund verändert sich die thermische Deformation der Kammer in diesen Zeiträumen nur geringfügig. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in den folgenden Bildern dargestellt. Abgebildet sind die Temperaturverteilung, die Deformation und der Innenradius, $r = r(\theta)$. Die geometrische Darstellung der Deformation ist stark überzeichnet, und liefert nur eine qualitative Aussage. Mit der Farbskala wird der Betrag der y -Verschiebung (vertikale Richtung) dargestellt. Die Verschiebungen beziehen sich auf den nicht deformierten Zustand bei einer *Referenztemperatur von 30 °C* . Die Lage der Querschnitte für die Radiusberechnungen ist in den Bildern markiert. Die Grenze des Einbaubereiches der Kammer (Maschinenschild) befindet sich bei $x = 482\text{mm}$ (Kammer mit $D=160\text{mm}$).

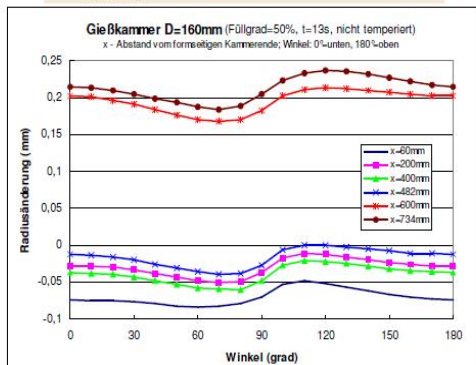
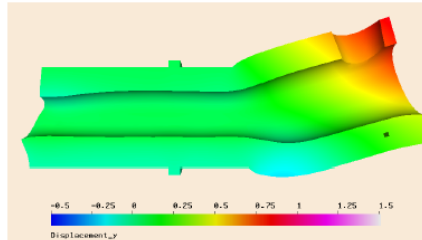
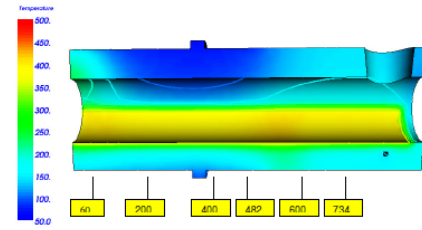
Über die thermisch bedingte Gießkammerdeformation können auf Grund der Berechnungen die folgenden Aussagen gemacht werden.

Im Einbaubereich, und insbesondere im Pressrestbereich, ist der Radius der Kammer kleiner als im Bereich der Einfüllöffnung. Der Unterschied ist stark von der Temperatur des Maschinenschildes und des Formrahmens im Bereich der Kammer abhängig. Diese Temperatur beeinflusst den Radius der Einbauöffnung, die ihrerseits die radiale Ausdehnung der Kammer begrenzt. Ist diese Temperatur niedrig, kann die radiale Ausdehnung der Kammer nur nach innen stattfinden, d. h. der Innenradius der Kammer im Einbaubereich wird im Gießbetrieb kleiner als bei Raumtemperatur. Dies ist beim Vergleich der Ergebnisse für eine niedrige ($64/47\text{ °C}$) und eine hohe (200 °C) Form-/Maschinenschild-Temperatur bei der 160mm -Kammer erkennbar. Diese Veränderung der Gießkammer hat einen unmittelbaren sehr wesentlichen Einfluss auf die Auslegung des Gießkolbens. Eine Temperierung der Gießkammer im Bereich der Einfüllöffnung hat nahezu keinen Einfluss auf die Verhältnisse im pressrestnahen Bereich. Beeinflusst wird nur die Umgebung der Temperierbohrung. Auf Grund der Deformation weicht die Gestalt der Kammerinnenwand im Gießbetrieb von der zylindrischen Form ab. Der Innenradius ist abhängig vom Winkel θ , und weist Minima und Maxima auf, deren Lage und Ausprägung sich während des Gießzyklus verändern, und durch den Füllgrad der Kammer in der Dosierphase beeinflusst werden.

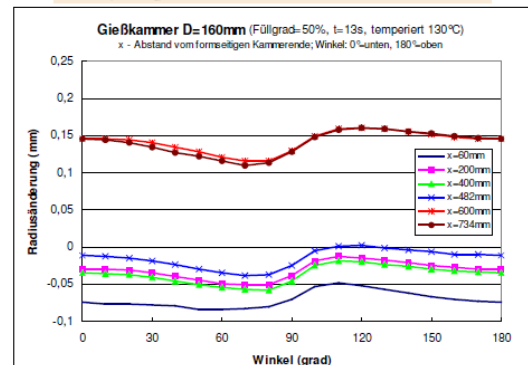
Gießkammer D=160mm; Füllgrad 50%; nicht temperiert; Isothermen: 100, 150, 200, 250, 300, 350 C



Gießkammer D=160mm; Füllgrad 50%; temperiert 130 C; Isothermen: 100, 150, 200, 250, 300, 350 C



Zeit=13s, Kammer 160 mm, Füllgrad 50%, nicht temperiert, Formrahmen/Maschinenschild 64/47 C



Zeit=13s, Kammer 160 mm, Füllgrad 50%, temperiert m. 130°C, Formrahmen/Maschinenschild 64/47 C

Ergebnisse aus der Praxis

Zur Überprüfung der in der Theorie gewonnen Erkenntnisse wurden Kolben des Kolben-Adapter-Systems entsprechend ausgelegt und im Praxiseinsatz ausgewertet. Es zeigte sich eine gegenüber dem Wettbewerbs-Kolben deutlich erhöhte Wärmeableitung. So war die Temperatur im Rücklauf der Kolbenkühlung um 8°C höher, die Temperatur am Pressrest um 100 °C niedriger.

Zudem wurden im Produktionsbetrieb 30 mbar niedrigere Vakuum-Werte erreicht.

Der Kolben alleine ist jedoch nur ein Bauteil als Einflussgröße auf die Gussteilqualität. Die Gießkammer darf hierbei nicht außer Acht gelassen werden. Die oben gezeigten Auswertungen zu Gießkammer lassen erkennen, welchen Einfluss die Temperierung der Gießkammer hat. Neben der Temperierung muss aber auch der gewählte Werkstoff für die Gießkammer und die Nitrierung betrachtet werden, will man die Lebensdauer der Gießkammer optimieren.

Dies ist insbesondere bei den für Strukturteile verwendeten Aluminium-Legierungen eine Herausforderung.

Zusammenfassung

Die in dem Artikel dargelegten Untersuchungen, Numerische Simulation der thermischen Verhältnisse und der thermisch bedingten Deformation in Gießkolben und Gießkammer, sowie Untersuchungen zum Werkstoff und der Nitrierung der Gießkammer gepaart mit den Ergebnissen aus der Praxis zeigen die wesentlichen Einflussfaktoren, die es zu berücksichtigen gilt. So kann ein erhöhter Kolbenverschleiß durchaus mit den Einbaubedingungen und den Temperaturen im Bereich Form / Maschinenschild in direktem Zusammenhang stehen. Auch ein falsche Auslegung des Gießkolbens oder eine zu starke Deformation der Gießkammer sind hier mögliche Ursachen.