

Boris Nogowizin

# Theorie und Praxis des Druckgusses

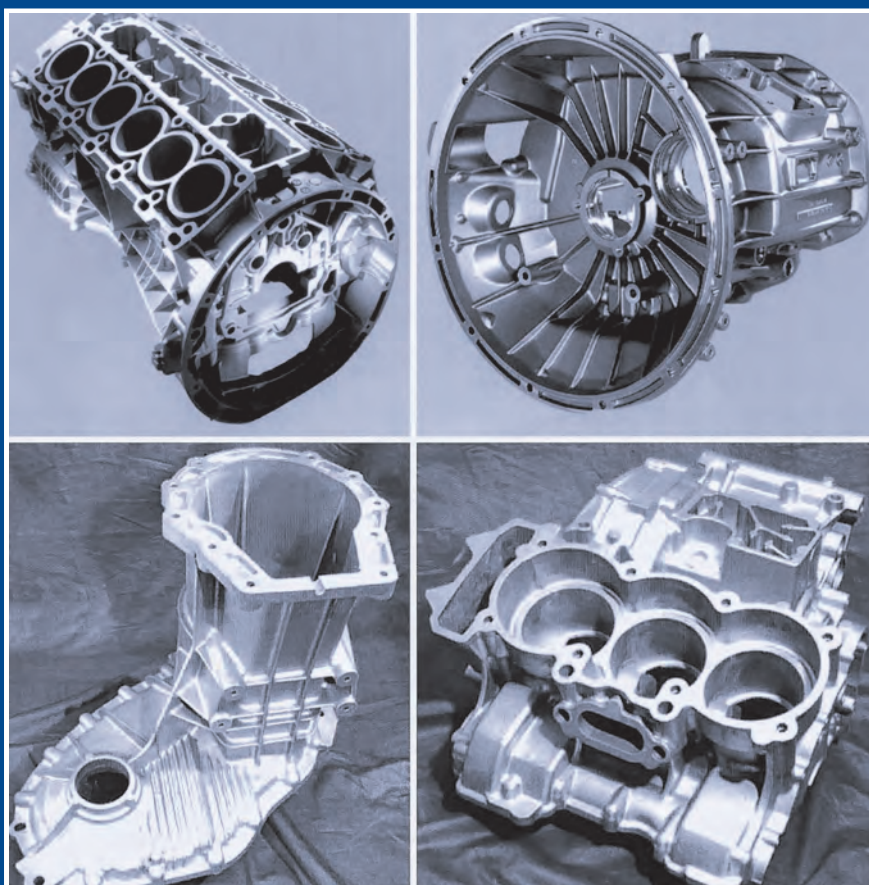


Tabelle 1.15 Berechnete Elastizitätsmodule in GPa für genormte Druckgusslegierungen in Abhängigkeit von der Temperatur [1.22]

Kurzzeichen	Temperatur in °C									
	20	100	150	200	250	300	350	400	450	500
EN-AC-ALSi10Mg(Fe)	74,8	72,4	70,6	68,8	66,6	64,4	61,9	59,3	56,1	52,9
EN-AC-ALSi12(Fe)	75,6	73,2	71,4	69,6	67,4	65,2	62,7	60,0	56,9	53,6
EN-AC-ALSi9	74,7	72,3	70,5	68,6	66,5	64,3	61,7	59,1	55,9	52,6
EN-AC-ALSi9Cu3(Fe)	75,8	73,3	71,5	69,6	67,5	65,3	62,6	60,0	56,8	53,5
EN-AC-ALSi11Cu2(Fe)	76,0	73,5	71,8	69,9	67,7	65,6	63,0	60,4	57,1	53,9
EN-AC-ALSi8Cu3	75,4	73,0	71,2	69,3	67,1	64,9	62,3	59,7	56,5	53,2
EN-AC-ALSi12Cu1	75,9	73,5	71,7	69,9	67,7	65,5	63,0	60,4	57,2	53,9
EN-AC-ALMg9	68,5	66,2	64,5	62,6	60,5	58,4	56,0	53,4	50,4	47,4
EN-MCMgAl8Zn1	46,7	45,2	44,0	42,8	40,7	39,7	38,0	36,1		
EN-MCMgAl9Zn1	44,4	42,9	41,8	40,6	39,3	37,9	36,4	34,9		
EN-MCMgAl2Mn	45,4	44,0	42,9	41,7	40,2	38,7	37,0	35,1		
EN-MCMgAl5Mn	46,0	44,5	43,4	42,2	40,7	39,1	37,4	35,6		
EN-MCMgAl6Mn	44,3	42,6	41,6	40,5	39,5	38,4	37,4	36,4		
EN-MCMgAl7Mn	46,3	44,9	43,7	42,5	41,0	39,4	37,7	35,9		
EN-MCMgAl2Si	46,1	44,4	43,3	42,2	41,2	40,1	39,1	38,0		
EN-MCMgAl4Si	46,0	44,6	43,5	42,3	40,8	39,2	37,5	35,7		
CuZn33Pb2Si-C	106,0	102,3	98,8	94,2	89,3	84,0	78,0	73,7	69,1	68,1
CuZn35Pb2Al-C	102,2	98,4	94,8	90,2	85,1	79,7	73,6	69,6	65,3	64,4
CuZn39Pb1Al-C	104,2	100,5	96,8	92,1	87,0	81,7	75,6	71,2	66,4	65,5
CuZn16Si4-C	123,0	120,0	117,2	113,8	110,2	106,3	101,9	97,2	92,0	89,7
ZP3 (ZnAl4)	92,9	89,7	85,7	79,6	73,9	68,2	62,2			
ZP5 (ZnAl4Cu1)	93,1	90,0	85,9	79,9	74,2	68,5	62,4			
ZP2 (ZnAl4Cu3)	93,7	90,5	86,5	80,5	74,8	69,1	63,0			
ZP8 (ZnAl8Cu1)	92,0	88,9	85,0	79,2	73,7	68,2	62,3			
ZP12 (ZnAl11Cu1)	91,2	88,1	84,3	78,7	73,3	67,9	62,2			
ZP27 (ZnAl12Cu2)	87,4	84,5	81,1	76,4	71,8	67,1	62,0			

## 1.6 Thermophysikalische Eigenschaften der Druckgusslegierungen

Bei der Simulation des Druckgießverfahrens und schon vom ersten Konstruktionsentwurf des Druckgussteils sowie der Druckgießform müssen eine Vielzahl der thermophysikalischen Eigenschaften der Druckgusslegierungen bei erhöhten Temperaturen als die einzugebenden Eingangsparameter bekannt sein, um praxisnahe Ergebnisse beim Gießen, Erstarren und Abkühlen des Druckgussteils zu erzielen. Zur Berechnung des Temperaturfeldes sind nicht nur mathematische Gleichungen mit spezifischen Randbedingungen erforderlich, sondern auch temperaturabhängige Werkstoffkenndaten.

Obwohl zahlreiche Forschungsarbeiten über thermophysikalische Eigenschaften der Druckgusslegierungen durchgeführt wurden, sind unsere Kenntnisse über den Zustand der flüssigen Druckgusslegierungen und den Übergang vom festen in den flüssigen Zustand noch recht beschränkt, da leider die thermophysikalischen Eigenschaften der vielen Druckgusslegierungen für diese Temperaturbereiche nicht immer in der Literatur verfügbar sind. In der Regel werden die physikalischen Eigenschaften der Druckgusslegierungen bei Raumtemperatur vorgestellt. Einige dieser Angaben stammen noch aus früherer Zeit, in der sich die chemische Zusammensetzung und

zulässige Beimengungsgehalte von den heute gebräuchlichen und genormten Druckgusslegierungen unterschieden. Die Daten müssen von der Raumtemperatur bis zur Liquidustemperatur der Druckgusslegierungen und weiter im Bereich der Schmelze ermittelt werden, um jeweilige qualitative Rechenergebnisse beim Einsatz der Simulationsprogramme zu bekommen. Die Magnesiumlegierungen wurden im Vergleich zu anderen Druckgusslegierungen am weitesten (bis zur Solidustemperatur) untersucht. Was die Aluminium-, Kupfer- und Zinkdruckgusslegierungen nach DIN EN betrifft, so ist es noch nicht umfassend gelungen, ihre physikalischen Eigenschaften im festen Zustand bei Solidustemperatur und im flüssigen Zustand festzustellen. Aus diesen Gründen scheint es lohnend, durch eine Reihe theoretischer Untersuchungen diese Lücke etwas auszufüllen.

### **1.6.1 Physikalische Eigenschaften der Druckgusslegierungen bei Raumtemperatur**

Die Modellierung und verschiedene technische Berechnungen des Druckgießverfahrens brauchen physikalische Daten der Druckgusslegierungen wie die Dichte, der mittlere lineare Wärmeausdehnungskoeffizient, die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit sowie die Schmelzwärme und die Solidus- und Liquidustemperatur, die von der Raumtemperatur bis zur Liquidustemperatur und im flüssigen Bereich bekannt sein müssen. Es gibt heute Fachliteratur über die Bestimmung der physikalischen Eigenschaften der Druckgusslegierungen bei Raumtemperatur in großer Zahl. Die Ergebnisse der umfangreichen Untersuchungen sind in Tabelle 1.16 dargestellt.

### **1.6.2 Physikalische Eigenschaften der Druckgusslegierungen bei erhöhter Temperatur**

Zur Ermittlung der physikalischen Eigenschaften der Druckgusslegierungen bei höheren Temperaturen stehen verschiedene Wege offen. Die allgemein zur Messung der Eigenschaften angewandten Verfahren sind jedoch bis zu denjenigen Temperaturen gut brauchbar, bei denen die untersuchten Körper noch eine gewisse Festigkeit haben. Werden sie sehr weich und gehen in den flüssigen Zustand über, ist meist ihre Anwendung schwieriger. Auf diesen Umstand sind die physikalischen Eigenschaften der Druckgusslegierungen für den flüssigen Zustand sowie den Übergang vom festen in den flüssigen Zustand nur verhältnismäßig wenig erforscht worden und kaum publiziert.

#### **1.6.2.1 Physikalische Eigenschaften von Elementen**

Da nicht für alle genormten Druckgusslegierungen die Werte der physikalischen Eigenschaften zur Verfügung stehen, können sie für reine Metalle angenommen werden. Es gibt umfangreiche Untersuchungen und gemessene Daten für Reinmetalle und Elemente, die nach kritischer Beurteilung aus [1.16, 1.22, 1.29] und vielen anderen Arbeiten sowie Forschungen entnommen wurden (Tabelle 1.17). Die physikalischen

Tabelle 1.16 Physikalische Eigenschaften von Druckgusslegierungen bei einer Raumtemperatur von 20 °C

Kurzzeichen	Dichte in kg/m <sup>3</sup>	Wärmeausdehnungskoeffizient 20 bis 100 °C in 10 <sup>-6</sup> /K	Spezifische Wärme- kapazität in J/(kg·K)	Wärmeleit- fähigkeit in W/(m·K)	Schmelz- wärme in kJ/kg	Temperatur		Quelle
						in °C		
						Solidus	Liquidus	
360.0 (AlSi10Mg)	2630	20,9	963	113	389	557	596	
380.0 (AlSi9Cu3)	2710	21,2	963	96	389	521	593	[1.9]
383.0 (AlSi10Cu2)	2740	21,1	963	96	389	521	588	[1.16]
384.0 (AlSi11Cu3)	2713	20,8	963	92	389	521	582	[1.27]
413.0 (AlSi12Cu)	2657	20,5	963	121	389	577	582	
518.0 (AlMg8)	2570	24,1	963	96	389	538	621	
AZ91 (MgAl9Zn1)	1813	25,5	1020	51	370	420	598	
AM60 (MgAl6Mn)	1782	25,6	1020	61	370	445	615	[1.11]
AM50 (MgAl5Mn)	1770	26,0	1020	65	370	440	620	[1.25]
AM20 (MgAl2Mn)	1750	26,0	1020	94	370	435	638	[1.28]
AS41 (MgAl4Si)	1770	26,1	1020	68	370	435	617	
AS21 (MgAl2Si)	1763	25,1	1020	84	370	435	632	
GD-CuZn37Pb	8460	19,2	380	84	145	890	910	[1.15]
ZnAl4	6600	27,4	419	113	105	381	387	
ZnAl4Cu1	6700	27,4	419	109	105	380	386	
ZnAl4Cu3	6600	27,8	419	105	105	379	390	[1.16]
ZnAl8Cu1 (ZA8)	6300	23,2	435	115	112	375	404	
ZnAl11Cu1 (ZA12)	6030	24,1	450	118	116	377	432	
ZnAl27Cu2 (ZA27)	5000	26,0	525	125	128	375	484	

Eigenschaften sind für die wichtigsten Elemente, aus denen eine Druckgusslegierung zusammengesetzt wird, dargestellt. Die Anhaltswerte der physikalischen Eigenschaften von Elementen und die mittlere chemische Zusammensetzung der Druckgusslegierung gestatten es, die physikalischen Eigenschaften der genormten Druckgusslegierungen im festen Zustand bei Raumtemperatur, beim Schmelzpunkt und im flüssigen Zustand theoretisch zu ermitteln.

Die Eigenschaft einer Druckgusslegierung wird allgemein als additive Eigenschaft aufgefasst. Das bedeutet, dass sich der Wert der Gesamteigenschaft der Druckgusslegierung aus der Summe von Einzelwerten der einzelnen Komponenten zusammensetzt. In diesem Fall beruht die Abschätzung der Druckgusslegierungseigenschaft darauf, dass aus den Einzeleigenschaften der Legierungselemente ein Mittelwert gebildet wird:

$$\frac{1}{B} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{B_i} \quad (1.5)$$

mit

$B$  Eigenschaft der Druckgusslegierung

$B_i$  Eigenschaft des Legierungselementes

Technische Druckgusslegierungen bilden entsprechend ihrer Zusammensetzung in der Regel Zustandsdiagramme mit vollkommener Mischbarkeit im flüssigen Zustand und beschränkter Mischbarkeit im festen Zustand beim Auftreten von einem oder mehreren Eutektika.

## 2 Porositäten und Gestaltungselemente der Druckgussteile

Aufgrund der technologischen Besonderheiten des Druckgießverfahrens ist eine Reihe von Gussfehlern im Druckgussteil dominierend und damit für die Qualitätsbeurteilung ausschlaggebend. Unter den zahlreichen verschiedenen Gussfehlern spielen die inneren Fehler und die Porosität eine zentrale Rolle. Die Höhe und der Umfang der Porosität hängen vom Fertigungsverfahren und der Gestaltung des Druckgussteils ab. Sinnvolle Porositätsanforderungen sollten auf der zentralen Ebene zwischen dem Druckgießer und dem Verbraucher abgestimmt werden. Entsprechend der späteren Funktion des Druckgussteils muss eine zulässige Porosität vorgegeben werden. Die Fertigungskosten der Druckgussteile können sich überproportional bei Forderungen nach geringer Porosität erhöhen.

Die wirtschaftlichen Vorteile des Druckgießverfahrens lassen sich nur realisieren, wenn das Druckgussteil gießtechnischgerecht für dieses spezielle Gießverfahren ausgelegt wird. Häufig kann schon eine kleine Änderung an der Konstruktion, die für die Funktion oder das Aussehen des betreffenden Druckgussteils unbedeutend sein mag, eine beachtliche Einsparung in der Fertigung bedeuten. Die Genauigkeit und der Preis eines Druckgussteils sind von der Kompliziertheit der Druckgießform abhängig. Je einfacher die geometrische Form des Druckgussteils ist, desto billiger und genauer lässt sich das Werkzeug bauen. Andererseits wäre es jedoch auch unangebracht, ganz allgemein zu fordern, dass die Druckgussteile möglichst einfach gestaltet sein sollten. Denn einer der wesentlichen Vorteile des Druckgießverfahrens liegt gerade in der Möglichkeit, komplizierte Gussstücke zu erzeugen, die auf andere Art gar nicht oder nur durch den Zusammenbau von Einzelteilen herstellbar wären.

Die endgültige Gestaltung eines gegossenen Druckgussteils und seine Eigenschaften hängen von einer Vielzahl verschiedener Einflussparameter ab, die sich in drei große Komplexe als Druckgusslegierung, Druckgusstechnologie und Druckgießform einordnen lassen, wobei die beiden letzteren über die konstruktive Auslegung und die technologischen Möglichkeiten der Druckgießmaschine sehr eng miteinander verbunden sind. Folglich umfasst der Begriff Gestaltung nicht nur die konstruktive Gestaltung des Druckgussbauteils, sondern auch die Auswahl der Druckgusslegierung, die Berücksichtigung des technologischen Ablaufs sowie die Standardisierung. Daher sollte die konstruktive Gestaltung eines technischen Druckgussteils, an das eine entsprechend hohe Qualitätsforderung gestellt wird, eigentlich nie ohne den Hintergrund der spezifischen Eigenschaften der Druckgusslegierungen, der Gestaltung der Druckgießform mit einem gießgerechten Gießlauf- und Entlüftungssystem sowie der technologischen Parameter der Druckgießmaschine betrachtet werden, da ohne die Berücksichtigung dieser Kriterien eine optimale Lösung für ein konstruktiv anspruchsvolles Druckgussteil nicht gefunden werden kann.

### 3.3.1 Toleranzfelder für formgebundene und nicht formgebundene Maße des Formhohlraums bei der Herstellung der Druckgießform

Um einen Überblick über die Toleranzfelder zu bekommen, ist es erforderlich, die verschiedenen Ausführungen des Formhohlraums und seine Maße zu betrachten. In Bild 3.5 sind zwei unterschiedliche Maßgruppen des Formhohlraums dargestellt, die verschiedene Toleranzfelder erfordern. Wenn die Maße innerhalb einer Formhälfte liegen und von starren unbeweglichen Formteilen gebildet werden, werden diese formgebundenen Maße  $L_0$  des Formhohlraums mit minimalen Toleranzen erreicht (Bild 3.5a). Die festen Kerne werden üblicherweise mit sehr engen Toleranzen gefertigt, so dass die Maße, die sich durch diese Kerne bilden, als formgebundene Maße betrachtet werden können.

Zur wirtschaftlichen Herstellung der Formbauteile sollten aber keine feineren Maßanforderungen, als für den technischen Zweck notwendig sind, vorgesehen werden, da enge Toleranzen kostenaufwendig sind. Das Toleranzfeld  $\Delta_H$  für formgebundene Maße des Formhohlraums bei der Herstellung der Druckgießform, wenn das Maß  $L_f$  des Formhohlraums in einem Bereich von 0 bis 500 mm liegt, kann durch das bekannte ISO-System für bearbeitete Werkstücke (IT-Toleranzen) mit dem Toleranzfaktor und dem entsprechenden Genauigkeitskoeffizienten  $K_G$  nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\Delta_H = K_G \cdot \left( 0,001 \cdot L_f + 0,45 \cdot \sqrt[3]{L_f} \right) \quad (3.12)$$

Ein Genauigkeitskoeffizient  $K_G$  von 0,07 kann als Größe der Toleranzen für formgebundene Maße des Formhohlraums nach DIN 16749 (Reihe 2) bestimmt werden [3.11].

Die Ungenauigkeit des Formhohlraums nimmt zu und die Maße des Gusstücks weisen größere Abweichungen auf und erfordern damit größere Toleranzen, wenn sie durch einen Kern, Schieber oder die Formteilung sowie zwei oder mehrere zueinander bewegliche Formbauelemente gebildet werden (Bild 3.5b).

Zur Festlegung der Toleranzen für diese nicht formgebundenen Maße sind mindestens zwei Gruppen erforderlich, da die Maße durch beide Formhälften zwangsläufig in der erreichbaren Genauigkeit empfindlicher sind, wenn sie sich nur innerhalb einer Formhälfte befinden.

Innerhalb einer Formhälfte betrachtet man die Maße  $L_1$  bis  $L_4$  der ersten Gruppe zwischen festen Formteilen und beweglichen Kernen (Bild 3.5b). Die beweglichen Kerne und Schieber werden mit entsprechend größeren Toleranzen und etwas größerem Passungsspiel gefertigt als die festen Kerne. Das Passungsspiel zwischen dem Kern und der Führungsbohrung wird durch Verschleiß bei der Arbeit der Druckgießform im Betrieb vergrößert, sollte aber kleiner als 0,05 bis 0,07 mm sein. Dieses Spiel stellt einen kritischen Wert für die Druckgießform dar, bei dem das flüssige Metall unter hohem Nachdruck während des Gießens noch nicht zwischen den Formbauelementen eindringen kann.

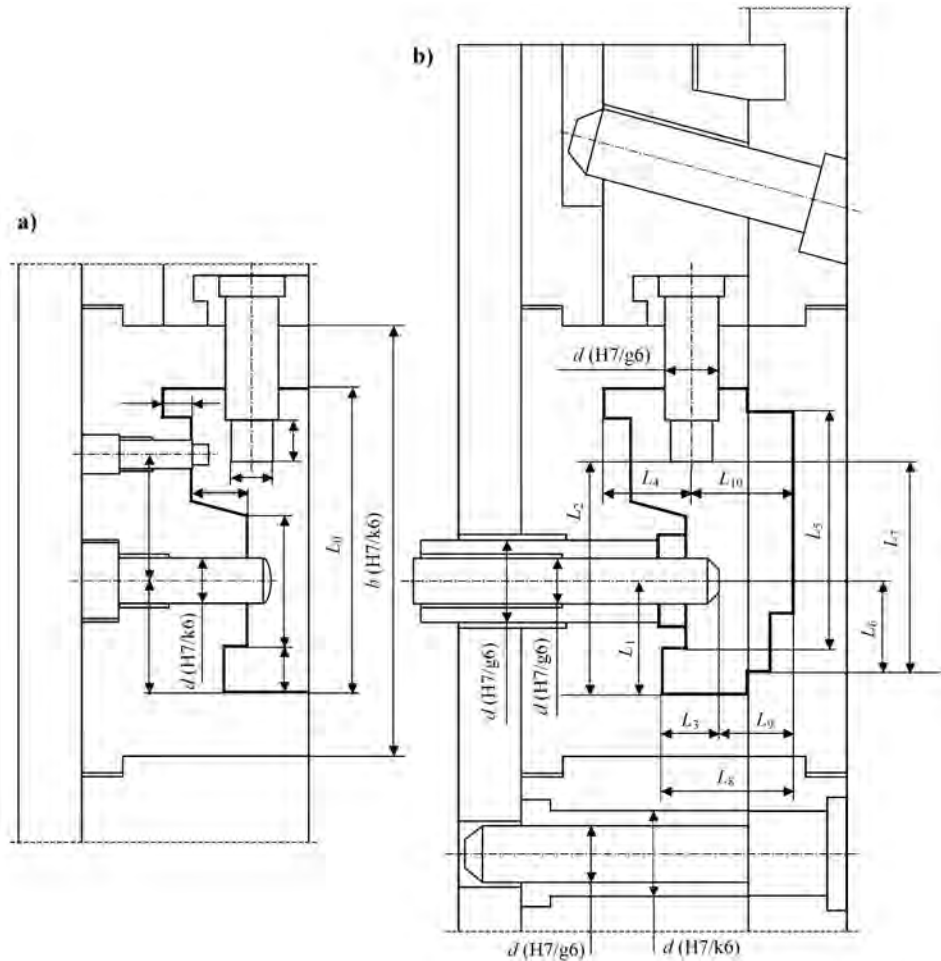


Bild 3.5 Formgebundene Maße (a) und nicht formgebundene Maße (b) [3.6]

Die zweite Gruppe betrifft die Maße  $L_5$  bis  $L_{10}$ , die sich durch beide Formhälften sowie parallel oder senkrecht zur Formteilung ergeben (Bild 3.5b). Die Maße  $L_5$ ,  $L_8$  werden durch feste Formelemente und die Maße  $L_6$ ,  $L_7$ ,  $L_9$  und  $L_{10}$  durch bewegliche Kerne gebildet.

Die Maße, die sich parallel zur Formteilung ergeben, hängen von Toleranzen zwischen vier Führungssäulen in der festen Formhälfte und den zugehörigen Führungsbuchsen in der beweglichen Formhälfte sowie von Toleranzen für die Formeinsätze ab. Die Maße, die sich senkrecht zur Formteilung ergeben, hängen in erster Linie von einem möglichen Aufdrücken der Formhälften am Ende der Formfüllung ab, so dass zwischen ihnen das flüssige Metall ausspritzen und Grat entstehen kann.

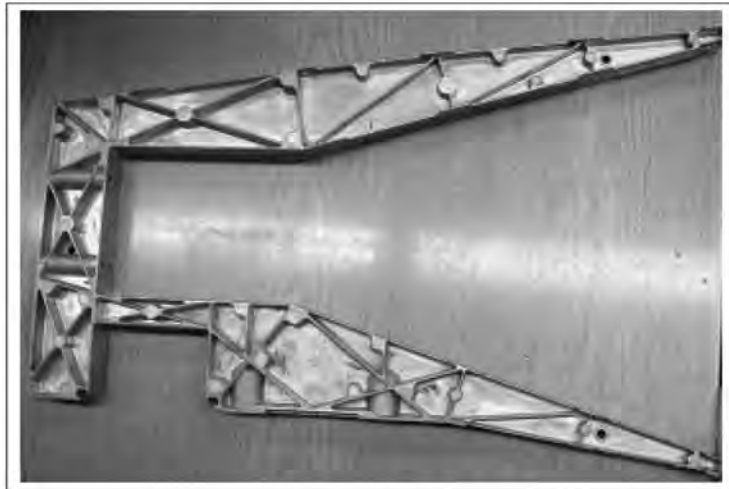
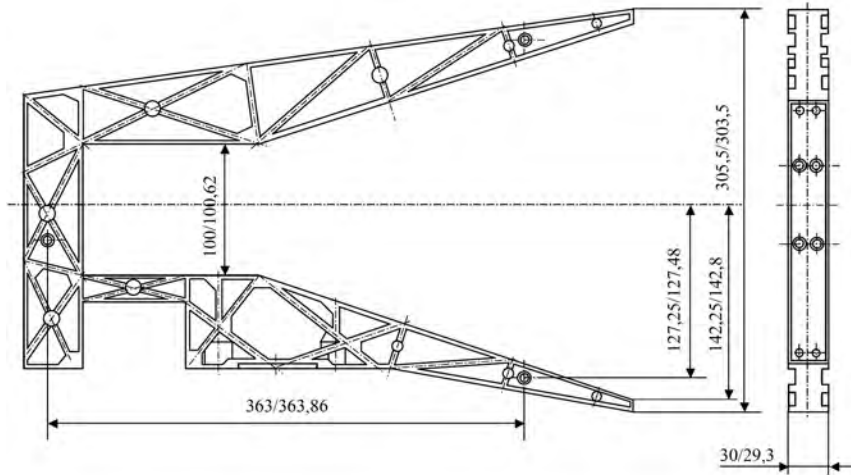


Bild 3.17 Schematische Darstellung und eine Aufnahme des Gussstücks „Steg SV 705 HS“ mit den gemessenen Maßen (G. A. Röders & Co. KG) [3.6]

Die Toleranzen hängen nicht nur von thermischen Maßänderungen infolge der lokalen Formtemperaturen und des Abbaus innerer Spannungen nach dem Entformen des Gussstücks aus dem Formhohlraum ab, sondern auch von der gesamten Steifheit und der einzelnen Schnitte des Gussstücks.

Die verschiedenen Messungen wurden von der Firma G. A. Röders GmbH & Co. KG durchgeführt, die die wichtigsten Funktionsmaße betrafen und mit denen sich große Toleranzprobleme ergeben. Diese Nennmaße aus der Zeichnung und die gemessenen Maße des gefertigten Gussstücks sind in Bild 3.17 dargestellt [3.6].



und den minimierten Sprühvorgang stärker als zweimal und mehr im Vergleich mit dem ohne Einsatz eines Formtrennstoffs gesenkt werden konnte. Die Formtrennstoffe dienen nicht nur zur Erleichterung der Entformung des Gussstücks und zum Schutz der Formgravurflächen, sondern auch zur Verminderung des Formgravurverschleißes. Die Wirkung anderer veränderlicher Einflussgrößen des Druckgießverfahrens, wie die Formzuhaltezeit, der Nachdruck auf das flüssige Metall und die Strömungsgeschwindigkeit im Anschnitt, ist auf die Entformungskraft geringer als die Wirkung des Formtrennstoffs. Jedoch sollten die Verkürzung der Formzuhaltezeit und damit der Abkühlzeit des Gussstücks in der geschlossenen Druckgießform sowie niedrige Nachdrücke angestrebt werden, um das Entformen des Gussstücks aus dem Formhohlraum mit optimalen Entformungskräften zu erreichen.

## 11.2 Ermittlung der Entformungskraft und der mittleren Druckspannung

In Bild 11.1 ist ein Gussstück durch äußere parallele Entformungskräfte  $F_i$  der Auswerferelemente mit der Gesamtentformungskraft  $F$  (Resultierende) beim Entformen belastet, die die gegengerichteten parallelen Abziehungskräfte  $K_j$  der Kerne und der anderen Teile der Formeinsätze der konturgebenden Gussstückoberfläche mit der Gesamtabziehungskraft  $K$  (Resultierende) hervorrufen. Zur Abschätzung der Resultierenden  $K$  und  $F$  sowie ihrer Koordinaten  $y_K, z_K, y_F$  und  $z_F$  wird ein  $x, y, z$ -orthogonales Koordinatensystem mit dem Punkt 0 im Zentrum des Auswerferzylinders der Druckgießmaschine eingeführt. Die  $y, z$ -Koordinaten liegen in der Ebene der Auswerferplatten, und die Koordinatenachse  $x$  ist die Symmetrieachse des Auswerferzylinders.

Das Problem zur Ermittlung der Resultierenden und ihrer Koordinaten eines Systems mit parallelen Kräften kann durch die Analogie der Schwerpunktberechnung gelöst werden. Da alle Kräfte parallel laufen, erhält man ihre Resultierenden durch algebraische Addition. Die Summe aller Momente der Kräfte muss gleich der Momentwirkung der Resultierenden sein. Es wird angenommen, dass die Abziehungskräfte  $K_j$  der Kerne und von anderen geschrunpften Gussstückbereichen sowie ihre Punktkoordinaten  $y_j$  und  $z_j$  beim Entformen des Gussstücks bekannt sind. Dann gelten folgende Formeln zur Berechnung der Gesamtabziehungskraft  $K$  und ihrer Koordinaten  $y_K$  und  $z_K$  des Schwerpunkts:

$$\begin{aligned}
 K &= \sum_{j=1}^m K_j \\
 y_K &= \frac{1}{K} \cdot \sum_{j=1}^m y_j \cdot K_j \\
 z_K &= \frac{1}{K} \cdot \sum_{j=1}^m z_j \cdot K_j
 \end{aligned}
 \tag{11.2}$$

Die Auswerferstifte müssen die Entformungskräfte  $F_i$  gleichmäßig in das Gussstück einleiten, so dass das Gussstück die Kräfte aufnehmen kann, ohne sich unzulässig zu verbiegen oder durchstanzt zu werden. Daher ist das Anbringen von Auswerferpunkten ein wichtiger Aspekt, an denen Entformungselemente angreifen können, um das Gussstück aus der Formkontur auszustoßen. Die Verteilung der Auswerferselemente ist jedoch in ziemlich engen Grenzen vorgeschrieben, und ihre Punktkoordinaten können nicht immer willkürlich ausgewählt werden, da sie von der Gussstückgeometrie sowie dem Temperiersystem der Druckgießform für Formeinsätze und Formplatten abhängen. Ungeeignete Auswerferpunkte an der Gussstückoberfläche erzeugen oft Markierungen an der Oberfläche oder können zu Einfallstellen führen. Zur Vermeidung der schädigenden Auswirkungen der Auswerferselemente beim Entformen des Gussstücks müssen die Angriffsbereiche der Auswerferselemente in der unmittelbaren Nähe der Einspannstellen wirken, an denen das Gussstück im Formhohlraum haftet. Hier spielen die Festigkeit und die Steifigkeit des Gussstücks bei der Entformungstemperatur eine entscheidende Rolle.

Die zum Lösen des Gussstücks aus dem Formhohlraum erforderliche Gesamtentformungskraft  $F$  erzeugt durch die Auswerferselemente und ihre Stirnflächen  $A_i$  Druckspannungen  $\sigma_i$  auf der Gussstückoberfläche, und ihre Koordinaten  $y_F$  und  $z_F$  lassen sich ähnlich nach den folgenden Gleichungen definieren:

$$\begin{aligned} F &= \sum_{i=1}^n F_i \\ y_F &= \frac{1}{F} \cdot \sum_{i=1}^n y_i \cdot F_i \\ z_F &= \frac{1}{F} \cdot \sum_{i=1}^n z_i \cdot F_i \end{aligned} \quad (11.3)$$

mit

$$F_i = \sigma_i \cdot A_i$$

$F_i$  Entformungskraft des Auswerferselements

$\sigma_i$  Druckspannung an der Stirnfläche des Auswerferselements

$A_i$  Stirnfläche des Auswerferselements

Im Idealfall müssen zum optimalen Entformen des Gussstücks die Gesamtentformungskraft  $F$  der Auswerferselemente und die Gesamtabziehkraft  $K$  der Kerne sowie ihre Koordinaten, da sich das Gussstück im Gleichgewicht befindet, zusammenfallen:

$$\begin{aligned} F &= K \\ y_F &= y_K \\ z_F &= z_K \end{aligned} \quad (11.4)$$