

Gießvorgänge beim Kokillenguss von Al-Legierungen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing. Marko Grzincic

geb. am 24.7.1971 in Liberec

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. mult. Eberhard Ambos
Prof. Dr.-Ing. habil. Jaroslav Exner

Promotionskolloquium am 3. 2. 2003

Schriftliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsberatung in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.

Magdeburg, 4.11.2002

Marko Grzincic

Motto der Arbeit:

Wer Großes tun will, muss die Einzelheiten gründlich durchdenken.

(Paul Valéry)

Diese Arbeit widme ich meinen Eltern, Jaroslava und Jan Grzincic, die mich während meiner Tätigkeit als Doktorand an der Technischen Universität in Liberec und nachfolgend an der Otto-von-Guericke-Universität in Magdeburg liebevoll und tatkräftig unterstützt haben.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Urformtechnik des Institutes für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung an der Otto-von-Guericke-Universität in Magdeburg.

Die Forschung wurde vom Kultusministerium des Landes Sachsen-Anhalt finanziert und ich möchte mich sehr für diese Unterstützung bedanken.

Mein besonderer Dank gebührt Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.h.c. mult. Eberhard Ambos für die Betreuung und die hilfreichen Anregungen während der gesamten Zeit dieser Arbeit.

Weiterhin danke ich Hon.-Prof. Dr.-Ing. habil. Rüdiger Bähr für seine wertvolle Unterstützung und konstruktive Kritik beim Fortgang der Arbeit, für das schon am Anfang meines Aufenthaltes in Deutschland entgegengebrachte Vertrauen und für die Möglichkeit unsere Ergebnisse einem breiten Fachpublikum auf vielen Tagungen bekannt zu geben.

Des weiteren gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. habil. Jaroslav Exner, bei dem ich die theoretischen Grundlagen des Gießereiwesens und aufschlussreiche Erkenntnisse für die Verarbeitung von Forschungsvorhaben im Rahmen des Doktorstudiums an der Technischen Universität in Liberec gewonnen habe.

Ich bin sehr stolz, dass der Industriepartner die Fa. Rautenbach-Guss GmbH Wernigerode war. Mein besonderer Dank gilt Herrn Krebs, der mir ständig die notwendigen Freiräume bei der Realisierung neuer Ideen gegeben hat und sie mit wertvollen Betriebserfahrungen untermauerte.

Schließlich bedanke ich mich an dieser Stelle bei allen Mitarbeitern der Abteilung Urformtechnik des IFQ, die mir stets kameradschaftlich mit Rat und Tat zu Seite standen.

Magdeburg, im November 2002

Marko Grzincic

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1	Einleitung Problemdarstellung und Ziele der Arbeit; Trends im Automobilbau	1
2	Der Zylinderkopf – ein sehr kompliziertes und beanspruchtes Gussteil ...	6
2.1	Funktion des Zylinderkopfes im Motor	7
2.2	Anforderungen an Zylinderköpfe	9
2.3	Werkstoffe für Zylinderköpfe	12
2.4	Allgemeine Bemerkung zum Zylinderkopf	13
3	Qualitätsbetrachtungen bei der Fertigung von Zylinderköpfen	14
3.1	Prozessparameter	18
3.2	Gussfehler	20
3.2.1	Porosität	20
3.2.2	Einschlüsse	23
3.3	Wirkung und Auswertung der Inhomogenitäten in der Struktur	24
3.3.1	Wirkung der Inhomogenitäten	25
3.3.2	Auswertung der Inhomogenitäten	27
3.3.2.1	Computerunterstützte Bildverarbeitung	30
3.3.2.2	Dichteprüfung	32
3.4	Undichte Zylinderköpfe	34
3.5	Ableitung von Schlussfolgerungen zu Qualitätsfragen	36
4	Gießverfahren zur Herstellung von Zylinderköpfen und ihre Bewertung ..	36
5	Metalltransport	41
5.1	Gießtechnik in Gießereien	43
5.2	Kritische Bewertung des Metalltransports	47
6	Gießsysteme beim Schwerkraftkokillenguss	47
6.1	Bodenguss	53
6.2	Seitenguss mit senkrechtem Schlitzanschnitt	55
6.3	Etagenanschnitt	56
6.4	Kopfguss	56
6.4.1	Einguss-Filterspeiser-Verfahren	57
6.4.2	Geometrische Charakteristik von einzelnen Komponenten des Kopf- gussgießsystems	58
6.4.2.1	Einguss	58

6.4.2.2	Querlauf	59
6.4.2.3	Anschnitt	60
6.5	Bewertung von Kopfguss und Bodenguss	60
7	Formfüllung	61
7.1	Visualisierung der Strömung	66
7.2	Modellierung mit Wasser als Modellflüssigkeit	67
8	Berechnung von Gießsystemen	69
8.1	Berechnung	70
8.2	Simulation	72
9	Durchgeführte Experimente und Ergebnisse	77
9.1	Untersuchungen am Löffel	77
9.2	Abgießen	79
9.2.1	Gießkurve	79
9.2.2	Gießstrahlcharakter, Auftreffbereich und Fallhöhe	81
9.2.3	Untersuchungen mit dem Ziel der Gestaltung einer neuen Tümpelgeometrie	85
9.3	Formfüllung	92
10	Zusammenfassung und Ausblick	97
11	Literatur	101
12	Anlage	110
	Lebenslauf	119

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung	Kapitel
P	kW	Motorleistung	2.2
V_H	cm ³	Hubraum	
p_m	bar	Mitteldruck (motorspezifischer Wert/Effektivität eines Motors)	
n	min ⁻¹	Drehzahl	
ρ	g cm ⁻³	Probendichte bei 20°C	3.3.2
ρ_w		Dichte des Wassers	
ρ_{max}		absolute Dichte einer Legierung	
ρ_L		Dichte der Luft	
m	g	Probengewicht in Luft	
m_1		Probengewicht in Wasser	
m_2		Gewicht des Wassers	
V_P	%	Porosität	6
Re		Reynoldszahl	
ν	m ² s ⁻¹	kinematische Viskosität; im Temperaturintervall 740 bis 760°C benutzt man $\vartheta = 6,1 \cdot 10^{-7}$	
R	m	Hydraulischer Durchmesser	
v_{max}	m s ⁻¹	maximale Geschwindigkeit	
σ	N m ⁻¹	Oberflächenspannung	
r	mm	Tropfen-Abmessung	
ρ	g cm ⁻³	Dichte der Schmelze	
h	mm	kapillare Steighöhe	
g	m s ⁻²	Fallbeschleunigung an der Erdoberfläche	
Θ	°	Randwinkel	
A_E	mm ²	Querschnittsfläche des Einlaufes	
A_L		Querschnittsfläche des Laufes	
A_A		Querschnittsfläche des Anschnitts	
v_n		Geschwindigkeit des vorletzten Elements der Füllungsfront	
v_{n+1}		Geschwindigkeit des letzten Elements der Füllungsfront	
p		Druck im letzten Element an der Füllungsfront	
$p_{atm.}$		atmosphärischer Druck	
v		Geschwindigkeitsvektor	
\bar{x}	μm ²	Mittelwert	9
$\Delta\bar{x}$	μm ²	Streubreite des Mittelwertes	
CAD		Computer Aided Design	8
S&A		Gießeinrichtung der Fa. Schmitz und Appelt (Typ A)	5; 9
GRT		Gießrundtisch	
DAS	μm	sekundärer Dendritenarmabstand	

Verzeichnis der Bilder

<i>Bild-Nr.</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Seite</i>
1	Gussstücke sind im Automobil sehr zahlreich vertreten	2
2	Potenziale und Forschungsschwerpunkte bei der Zylinderkopfherstellung aus Aluminium	2
3	Mittel und Methoden der Prozessanalyse zur Lösung der formulierten Ziele	4
4	F1 Ferrari Motor V10 (a) und Porsche/TAG-Heur Zylinderkopf mit Kopfhäube des Turbomotors für McLaren (b)	5
5	Entwicklungsschwerpunkte der zukünftigen Motoren	6
6	Bezeichnung der Ansichten eines Zylinderkopfes	7
7	Funktion des Zylinderkopfes	8
8	Virtuelle Aggregatentwicklung – die Ladungsbewegung im Brennraum beeinflusst durch Kanalgeometrie a) und Strömungssimulation im Wassermantel b)	8
9	Verfeinerung der Anforderungen	9
10	Art und Lokalisierung der mechanischen und thermischen Beanspruchung des 4-Ventil-Zylinderkopfes mit Rollenschlepphebel für einen 6-Zylindermotor TDI und des 2-Ventil-Zylinderkopfes Pumpe-Düse für einen 4-Zylindermotor	10
11	Temperaturbelastung im Brennraumbereich eines 2-Ventil Zylinderkopfes (a) und Spannungszustand am 4-Ventil Zylinderkopf Pumpe-Düse (b)	11
12	Vorgehensweise bei der Ursachenforschung von Gussfehlern	14
13	Null-Fehler-Produktion in Prozessketten mittels Qualitätsplanung und -lenkung	15
14	Beherrschte Schmelzequalität ist eine erforderliche Grundbasis für den erfolgreichen Weg zu gewünschten Gussstückeigenschaften	16
15	Schnitt eines Zylinderkopfes aus AlSi6Cu4 mit Strukturbeispielen, Dendritenarmabstand, Härte und mechanischen Eigenschaften über der Bauteilhöhe	17
16	Ishikawa-Diagramm der Gießanlage: Haupteinflüsse – Ursachen und Wirkungen – auf die Zielgröße Gussstückqualität	18
17	Detaillierung eines Ishikawa-Diagramms für den Gasgehalt von Al-Schmelzen	19
18	Einflüsse auf die Gefügeausbildung und die Eigenschaften von Gussstücken	19
19	Abhängigkeit der Wasserstofflöslichkeit von der Temperatur für verschiedene AlSi-Legierungen bei einem Wasserstoffdruck von 1 bar	21
20	Änderung der Wasserstoffgehalte durch die Umfüllprozesse für unbehandelte und veredelte Schmelzen der Legierungen AlSi7Mg und AlSi9Mg	22
21	Zusammenhang zwischen dem Porositätsanteil, der Porengröße und der Temperaturwechselbeständigkeit bei AlSi6Cu4	25
22	REM-Aufnahmen vom Gefüge a) Bruchoberflächenstruktur in der Nähe von einem Defekt, Vergrößerung 36x b) Struktur einer heterogenen Erstarrung der Silumin innerhalb und außer Oxidhaut, Vergrößerung 150x	28
23	Struktur von AlSi7Mg0,3 mit großem Anteil an Oxidhäuten (a) und großen Poren (b), Vergrößerung 150x	29
24	Gussfehler beobachtet mit REM a) Bruchoberfläche bei Anwesenheit von freigelegten Dendriten der α -Phase / Vergrößerung 200x b) Lunker / Vergrößerung 100x c) Kombiniertes Fehler / Vergrößerung 170x	29
25	Gussfehler beobachtet mit REM	30

	<ul style="list-style-type: none"> a) endogene Gaspore / Vergrößerung 170x b) Detail vom Porenboden mit dem Skelettgebilde von intermetallischen Phasen und Si-Kristallen/hell / Vergrößerung 700x c) exogene Gaspore / Vergrößerung 17x d) Detail der mit Oxiden belegten Wand einer Gaspore / Vergrößerung 170x 	
26	Ablauf der metallographischen Probenauswertung unter Verwendung eines computergestützten Bildverarbeitungssystems	31
27	Bezugsflächen für die Porositätsbestimmung	32
28	Zur Dichteprüfung notwendige Analysenwaage (Typ BP 221S von Sartorius AG) und Pyknometer	33
29	Bruchfläche im undichten Bereich des Zylinderkopfes	34
30	Beispiele von kompakten Oxidhäuten in der Struktur des Werkstoffes Al-Si10Mg (Vergrößerung 50x)	35
31	Unterbrochener Abguss und Beispiel eines Defektes	35
32	Oxidhaut als Ursache eines undichten Zylinderkopfes	35
33	Gießverfahren für Aluminium-Zylinderköpfe	38
34	Möglichkeiten der Gießlagen-Orientierung	39
35	Bewertungskriterien der Form-/Gießlage und Gießsystemtechnik bei Zylinderköpfen	39
36	Verkettung der Prozessstufen in einer Al-Gießerei mit dem Schwerpunkt Schmelzetransport	41
37	Ausbildung des Gießstrahles während des ersten Umfüllprozesses nach einer Gießzeit von 10s für eine kurze (a) und lange (b) erste Umfüllzeit und Mechanismus der Lufteintragung in die Schmelze	42
38	Schematische Darstellung des Metalltransportes beim Zylinderkopfguss	43
39	Vier unterschiedliche Anordnungen von Schmelz-, Behandlungs- und Gießaggregaten zum Kokillenschwerkraftgießen	44
40	Gießkarussell mit sechs Kokillenmaschinen, manuellem Kerneinlegen und einem Gießroboter mit zwei Gießlöffeln	45
41	Metalltransportanalyse beim Schmelzen von Aluminium im Erdgas-schachtofen und Gießen auf einem Gießkarussell	45
42	Illustrative Veranschaulichung des Effektes von steigender Fallhöhe beim Schwerkraftguss von Aluminium	46
43	Umfüllvorgang soll bei minimalen Fallhöhen verlaufen	46
44	Geschwindigkeitsprofil beim Gießen mit einer Pfanne	47
45	Typische Gießsysteme zum Gießen von Eisenlegierungen a und b, und zum Gießen von Al-Legierungen c bis e	49
46	Kräftegleichgewicht auf der Grenzfläche; die Trägheitskräfte infolge der Geschwindigkeit haben einen Hang zum Oberflächendurchbruch, aber die Oberflächenspannung leistet Widerstand	51
47	<ul style="list-style-type: none"> a) Einsatz von einem Siebkern oder einem Gewebefilter b) geteilter Einlaufquerschnitt c) Einsatz von einem Schaumfilter d) „Schlangenlauf“ e) Z-förmiger Eingießkanal 	52
48	Bodengussprinzip für Zylinderköpfe	53
49	<ul style="list-style-type: none"> a) Zylinderkopf mit Keramikfilter im Gießsystem (Volvo) b) Zylinderkopf mit Gießsystem, Brennraumseite oben (Skoda) c) Zylinderkopf mit Gießsystem (GM) d) Kokille zur Zylinderkopferstellung nach dem Bodengussprinzip 	54
50	Von der Seite, im Kettenkasten, angeschnittenen Zylinderkopf mit Speiser	55
51	Drei Typen von Etagenanschnitten und Schema eines Gießsystems nach Typ A	56
52	Schematische Darstellung der Kokille	56

53	Räumliches Schema der Kokille mit Hauptbestandteilen	57
54	Zylinderkopf GM gegossen durch Speiser (DYPUR-Eingießverfahren) und schematisch dargestelltes Speisungssystem	57
55	Untersuchungen zur Formfüllung über Speiser	58
56	Charakteristische Abmessungen des Gießtumpels für Kopfguss und Darstellung des Gießstrahles beim Gießen	59
57	Gießtumpel des Kopfgussgießsystems an Kokillen für Zylinderköpfe	59
58	Anordnung und Ausführung eines Anschnittes	60
59	Konventionelles Gießsystem und Variante mit geknickten Anschnitten	60
60	Strömungsformen im senkrechten und waagerechten Rohr	62
61	Geometrie von zwei Gießsystemen zum Gießen von Zylinderköpfen	63
62	Bewegung der Flüssigkeit entlang einer geneigten Wand	63
63	Beispiele geschnittener Zylinderköpfe	64
64	Zylinderkopf VW 1,0 l mit Gießsystem und Speisern	64
65	Schematische Darstellung der möglichen Formfüllungsunterbrechung	65
66	Positionierung des Schaumfilters im Kopfgussgießsystem (a) und andere Ausführung des Gießsystems (b)	65
67	Versuchsdosiereinrichtung mit der „gläsernen“ Kokille	68
68	Effekt der Strömungsteilung beim Abguss	68
69	Beispiel der Simulation mit freier Oberfläche, Software Fluent und STAR-CD	72
70	Arbeitsschritte bei der Simulation von Strömungsvorgängen	73
71	Bahnlinien von fließenden Teilchen; die Farbskala informiert über die Strömungsgeschwindigkeit	74
72	Geschwindigkeitsprofil im Kopfguss-Gießsystem	75
73	Geschwindigkeitsprofil in den Anschnitten	75
74	Analyse der Richtung und Größe von Geschwindigkeitsvektoren	75
75	Turbulenz und statischer Druck am gießtechnologisch ungünstigen gestalteten Gießlauf	76
76	Druckentwicklung im Gießlauf bei nichtstationärer Simulation	76
77	Drei Phasen der automatischen Löffelfüllung a) Phase 1: Schmelze fällt vom Siphoneinlass zum Löffelboden b) Phase 2: Großflächiger Atmosphärenkontakt bei der Löffelfüllung c) Phase 3: Intensive Verwirbelung an der Löffelkontur	78
78	Oxidhautreste nach dem Abguss von AlSi6Cu4 im Bereich der Gießschnauze mit den Gesamtabmessungen (a) und der Dicke (b) /Angaben in mm/	78
79	Verlauf der Gießleistung in Abhängigkeit von der Masse und der Zeit	79
80	Schematische Darstellung der Versuchsdosiereinrichtung	80
81	Steuerung des Kippens des Löffels nach Rautenbach [162] und gemessene Gießleistung	80
82	Neue Steuerung des Kippens des Löffels und gemessene Gießleistung	80
83	Videotechnik für Strömungsaufnahmen an der Versuchsgießeinrichtung zur Strömungsmodellierung mit Wasser	81
84	Einfluss der Gießschnauze auf den Querschnitt des Gießstrahles (Strömungsquerschnitt im definierten Abstand vom Behälter)	81
85	Phasen der Tümpelfüllung bei der Modellierung mit Wasser; aufgenommen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera durch Plexiglas	82
86	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen an realen Kokillen; Gießroboter mit Gießlöffel in Gießposition	82
87	Wanderung des Gießstrahls beim Abguss bedingt durch un stabile Schnauzenpositionierung (a) und veränderliche Gießleistung (b)	83
88	Querschnitte des Gießstrahls beim Handguss (links) und Roboterabguss (rechts)	83

89	Strahlcharakter beim Gießen von Aluminium und pulsierende Strömung bei technologisch nicht beherrschtem Abguss	84
90	Gießlöffel mit eckiger Gießschnauze und durch die Oxidhaut und den Oxidschlauch vor weiteren Oxidation geschützte Schmelze	85
91	Vorschlag einer neuen Gießtumpelgeometrie und das erzeugte „Glasmoddell“	86
92	Löffelposition am Gießtumpel a) „indirekt“- Gießeinrichtung Typ A (siehe auch Bild 5.1.1A) b) „direkt“ - Gießkarussell	86
93	Strömungsuntersuchungen an der gläsernen Kokille mit direktem und indirektem Abguss	87
94	Phasen der Füllung der gläsernen Kokille mit gefärbtem Wasser	87
95	Darstellung des Messschriebs der Temperaturentnahmen an den Kokillen	88
96	Zeitregime am Gießrundtisch und der Gießzelle mit der Gießeinrichtung vom Typ A	88
97	Mittels Dichtprüfung ausgewertete Porosität im Nockenwellenbereich des Zylinderkopfes	90
98	Gemessene Porosität im Brennraum und Wasserraumkernbereich beim direkten und indirekten Abguss	90
99	Optimierter Gießtumpel für Kopfguss	91
100	Günstiger (a) und ungünstiger (b) Übergang des Gießtumpels in den Gießlauf	92
101	Wassermodellierung am transparenten Gießsystem in drei Füllungsphasen	92
102	Gießsystem mit Quarzglasscheibe und Querlauf nach unterbrochenem Abguss – erstarrende Schmelze unter den Anschnitten	93
103	Wanderung des Gießstrahls durch die veränderliche Duckenergie in nacheinander folgenden Füllungsetappen der Gießlauffüllung	94
104	Phasen der Formfüllung, aufgenommen durch die Hochgeschwindigkeitskamera	95
105	Gussteile nach dem unterbrochenen Abguss, drei Stufen	96
106	Entlüftung des Gießlaufes über dem ersten Anschnitt und an seinem Ende	97
Anlage		
1	Abhängigkeit des Dendritenarmabstandes von der Erstarrungsgeschwindigkeit, Werkstoff AlSi9Cu3	110
2	Vergleich mit verschiedenen Gießverfahren erzielten Festigkeitseigenschaften; Verdeutlichung der Unterschiede bei den erzielten Streubreiten	110
3	DAS-Verläufe in Abhängigkeit vom Herstellungsverfahren	110
4	Qualitätsindex für mit konventioneller Technologie gegossene Zylinderköpfe und für Rotacast-Zylinderköpfe	111
5	Dauerschwingfestigkeit (R=0,05; T=150°C; 50 Hz) an Werkstoffproben aus Realgussteilen, gegossenen durch unterschiedliche Gießverfahren	111
6	Einteilung von Gießverfahren nach VAW	112
7	Break-even-point-Bestimmung beim Kostenvergleich zwischen Kokillengieß-(KGV), und Kernpaketverfahren	112
8	Kostenvergleich zwischen dem Kokillenschwerkraftgießen- (KGV), dem Grünsand- (GSFV) und dem Kernpaket- (Cosworth) Verfahren auf der Basis einer Jahresproduktion von 130.000 Aluminiummotorblöcken	112
9	Kostenvergleich Lost Foam und Niederdruckguss beim Gießen von Zylinderköpfen	113
10	Verbindung des Etagengießsystems mit getrennter Formhohlraumfüllung und nachfolgender Speiserfüllung	113
11	Punktuelle Kopfguss zum Gießen von Zylinderköpfen entwickelt von Fosco	113

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle-Nr.</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Seite</i>
1	Spitzendrücke und –temperaturen an PkW Otto- und Dieselmotoren	11
2	Entstehungsursachen von Porosität in Gussstücken und ihre Beeinflussung durch die Fertigungsbedingungen	21
3	Zulässige Werte der Reynoldszahl und der Trägheitskräfte für die Elemente des Gießsystems	50
4	Legende zum Bild 6.1.2	55
5	Werte von Ähnlichkeitskriterien für das Wassermodell mit der Anwendung bei Stahl-Systemen	71
6	Ergebnisse der Zeitlupe für die Hochgeschwindigkeitsaufnahme der Gießlauffüllung	96
Anlage		
1	Mechanische Eigenschaften der Al-Gusslegierungen für die Zylinderköpfe	114
2	Bewertung der Gießverfahren hinsichtlich der wichtigsten Merkmale	115
3	Bewertung verschiedener Anschnittsysteme	116
4	Anforderungen an die Werkzeuge bei unterschiedlichen Gießsystemen	117
5	Bewertungsmatrix Kopf- und Bodenguss	117
6	Übersicht von gießereitechnischen Simulationsprogrammen	118

1 Einleitung. Problemdarstellung und Ziele der Arbeit

Die Automobilproduktion nimmt weltweit eine führende Stellung in der Gesamtwirtschaft ein. So werden in Europa mehr als 20 Mio. Pkw produziert [1]. Die Automobilindustrie wird auch perspektivisch ein strategischer Gussabnehmer bleiben (Bild 1), daher ist es notwendig die Entwicklungstrends in dieser Branche zu verfolgen [2].

Die Automobilhersteller sind aufgefordert, den Kunden Produkte mit immer höherem Komfort, größerer Funktionalität und Sicherheit, bei extrem hoher Zuverlässigkeit, anzubieten. Die Automobilzulieferindustrie steht außerdem unter einem starken Kostendruck, welchem sie vordergründig durch die Umsetzung von Innovationen entgegenwirkt. Im Automobilbau steht die Forderung nach Leichtbaukonzepten unter Nutzung von Aluminium als eine wichtige Aufgabe an. Z.B. werden in den USA bereits 70% aller Al-Gussteile für die Automobilindustrie hergestellt. Der überwiegende Teil von gegossenen Motorkomponenten aus Aluminium wird heute in metallischen Dauerformen hergestellt. Aus den Ansprüchen an das Gesamtfahrzeug folgen die hohen Anforderungen an einzelne Komponenten und sogar an einzelne Baugruppen von Komponenten.

Der Zylinderkopf ist eines der komplexesten Gussstücke und im Automotormotor neben dem Zylinderkurbelgehäuse das geometrisch komplizierteste. Zylinderköpfe für Personenkraftwagen werden heute ausschließlich aus Aluminium erzeugt. Die Motorforschung und neue Entwicklungen des Motors wirken sich direkt auf den Zylinderkopf aus. Die gegossenen Zylinderköpfe werden ständig komplizierter, wobei sie den höheren Anforderungen in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften gerecht werden müssen. Um die steigenden Anforderungen an gegossene Zylinderköpfe erfüllen zu können, sind sowohl die Konstrukteure als auch die Gießer aufgefordert ständig neue, innovative Lösungen zu suchen. Als Ergebnis der vielgestaltigen Bemühungen zur effektiven Fertigung hochleistungsfähiger Gussteile für die Automobile wurden verschiedene Fertigungsverfahren entwickelt. Eine breite Palette von Gießverfahren und der Gussstückpositionierung in der Form (Kap. 4), verschiedene Gießaggregate, incl. ihrer Anordnung in Gießzellen (Kapitel 5), der Art des Gießsystems (Kap. 6) und letztendlich eine objektive Bewertung der Gussstückqualität (Kap. 3.3.2) sind charakteristische Schwerpunkte der Produktion eines Zylinderkopfes. Auch die, in den letzten Jahren intensiv genutzte Simulation des Gießprozesses ist hinsichtlich ihrer Aussagekraft zur Formfüllung des Schwerkraftkokillengusses verbesserungsbedürftig und kann nur begrenzt für eine praktische Optimierung des Gießsystems genutzt werden (Kap. 8).

Welche Potenziale bieten sich dem Gießer bei der Erfüllung von solchen Aufgaben überhaupt an? Die Ergebnisse von Überlegungen hierzu sind im Bild 1.2 mit Beispielen für Aufgabenfelder und Lösungsansätze in Themenbereichen dargestellt. Die Potentiale sind systematisch gegliedert, d. h. von Maßnahmen im Rahmen der Technologieplanung, über die Schmelzebehandlung und Verfahrensoptimierung bis zur Behandlung von fertigen Gussteilen.

Neben der Entwicklung neuer Form- und Gießverfahren ist die Verbesserung **konventioneller** und in der Praxis **bewährter** Verfahren von besonderem Interesse. Die Themenstellung der vorliegenden Arbeit lautet deshalb:

Gießvorgänge beim Kokillenguss von Al-Legierungen.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit ist der Metalltransport unter der Voraussetzung, dass die Schmelze einen guten metallurgischen Qualitätsstandard im Warmhalteofen aufweist. Dabei werden bei einer entsprechenden Gestaltung Voraussetzungen für hochwertige Gussteile geschaffen. Im Vordergrund aller Optimierungsvorhaben stehen die erreichte Gussstückqualität und der Ausschussanteil. Die Qualitätskriterien und die Qualitätsbewertung von Gussstücken werden im Kapitel 3 diskutiert. Durch die aus Untersuchungen resultierenden technologischen Maßnahmen soll in erster Linie der undichte Guss vermieden werden. Die technologischen Maßnahmen beziehen sich auf die Umfüllprozesse beim Schmelzetransport und auf die Gießsystem-/Formfüllung. Der einzelne Abguss steht im Mittelpunkt. Dies haben drei Aspekte hervorgerufen:

1. In der Fachliteratur wird stets darauf orientiert, die Schmelze auch beim Schwerkraftguss ruhig zu transportieren. Der Kopfguss wird dabei nur selten als Beispiel aufgeführt (Anschnittsystem und Gießtechnologie). In diesem Zusammenhang ist die Frage zu diskutieren, ob beim Füllen des Gießtumpels ungünstige dynamische Strömungsverhältnisse entstehen (siehe Bild 37).
Das Ziel wurde dabei so formuliert: **Festlegung einer zweckmäßigen Art des Abgießens.**
2. Der zweite Grund ist der Aspekt, dass für den Start des Seriegießens nach der von Hand gegossenen Vorserie eine erhöhte Ausschussrate typisch ist. Vermutlich hat also die Führung des Gießstrahls und der Charakter der Gießsystemfüllung einen bedeutenden Einfluss.
Es wurde folgendes Ziel formuliert: **Herausarbeitung der Unterschiede beim Abgießen durch einen Gießautomat gegenüber einem erfahrenen Gießer und Applikation der Erkenntnisse auf die Robotersteuerung.**
3. Der dritte Grund war der Einsatz einer breiten Palette von Gießtumpeln in zwei repräsentativen Kokillengießereien, Bild 57. Die konstruktive Mannigfaltigkeit charakterisieren unterschiedliche Verhältnisse der Masse des Tumpels zu den Massen des ganzen Gießsystems, die sich zwischen 15 und 40% bewegen. Dabei war nicht klar, welche Geometrie welche Wirkung auf die Qualität des Gussteiles besitzt.
Es wurde ein Ziel formuliert: **Einsatz eines universellen Gießtumpels in allen Kokillen, die zur Herstellung von hochkomplizierten Teilen, wie z. B. durch Kopfguss erzeugte Zylinderköpfe, verwendet werden.**

Nach umfangreichen Untersuchungen wurden zwei Methoden ausgewählt und ihre Aussagekraft definiert, mit denen in den gegossenen Zylinderköpfen aus Aluminium die Porosität ausgewertet wurde (Kapitel 3.5). Dieser Parameter wurde als ein Kriterium der Homogenität des Werkstoffes definiert, d. h. er ist ein Qualitätskriterium und beeinflusst die dynamischen Eigenschaften bei höheren Temperaturen.

Die Kopfgussgießsysteme werden in der Fachliteratur aus theoretischer aber auch aus praktischer Sicht sehr selten diskutiert. Daher widmet sich Kapitel 6 diesem Gegenstand. Die möglichen Richtungen der Strategie zur **Prozessanalyse**, orientiert auf die Strömungsproblematik, stellt das Bild 3 dar. Basis dafür ist die Visualisierung des realen Prozesses mit Hilfe von Videotechnik. Die an der zusammengebauten Kokille nicht sichtbaren Strömungsvorgänge wurden mit Hilfe von warmfesten Glasscheiben aufgedeckt (Kapitel 7.1 und 9). Es wurde eine „gläserne“ Kokille aus Kunstharz gefertigt, Strömungsuntersuchungen mit Was-

ser durchgeführt (Kapitel 7.2 und 9) und eine Computersimulation eingesetzt (Kapitel 8.2). Es wurde die Nutzung der Ähnlichkeitstheorie und einer theoretisch-physikalischen Basis der Computersimulation beschrieben (Kapitel 8).

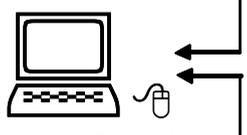
Grundlage	Analyse des Prozesses am realen Gießwerkzeug	Strömungsuntersuchungen am durchsichtigen Modell	Nutzung der Computersimulation	Einsatz der Ähnlichkeitstheorie
Beispiele	1. Videoaufnahmen - klassische Videotechnik - Hochgeschw.-Kamera 2. Kontaktmethode 3. Thermographie 4. Radiographie	Videoaufnahmen an der „gläsernen“ Gießform: a) Kunstharz b) feuerfeste Werkstoffe (z. B. Aerogel)	Vernetzungswerkzeuge mathematische Methode  physikalisches Modell phys. Eigenschaften Anfangsbedingungen	Analogie mit a) Wassermodell b) Elektromagnet. Modell

Bild 3 Mittel und Methoden der Prozessanalyse zur Lösung der formulierten Ziele

Es sind nicht nur die konjunktur- oder jahresbedingten Marktschwankungen, welche den Automobilproduzenten Sorgen bereiten. Ein zunehmendes Problem stellt der sinkende Gewinn als Ergebnis des Konkurrenzkampfes dar, der die Automobilwerke zwingt, ständig höhere Qualität für niedrigere Preise anzubieten [3]. Daraus folgt, auch in der Zulieferindustrie entsteht ein gesteigertes Konkurrenzverhalten. Die Prognose der Weltbank, dass im Bereich der Automobilindustrie in den nächsten 30 Jahre die Produktion in Osteuropa um 200% und in Asien sogar um 3000 bis 9000% steigen soll, gibt etwas Hoffnung.

In den letzten Jahren hat sich die Erkenntnis deutlich vertieft, dass insbesondere unser Fachwissen ein ganz wichtiger Produktionsfaktor ist, der mit fortschreitender Zeit zunehmend auch noch an Wichtigkeit gewinnen wird. Wie kann angesichts dieser Entwicklung der stürmische Informationsfluss für neue Ideen und Techniken sinnvoll und umfassend ermittelt und bewertet werden? Lassen sich Perspektiven für die Zukunft, zum Beispiel der Verbrennungsmotoren, durch zusammengetragenes Wissen überhaupt erkennen?

Offenkundig ist, dass der Erwerb von Know-how und Wissensweiterentwicklung zum Thema Motorentechnik einem hochdynamischen Prozess unterworfen ist. Er erschwert Zukunftsorientierung und bleibt ohne gezielte Konzepte und weiterführende Methoden sicher auch ohne durchgreifende Wirkung im Management. Wissensgestützte Unternehmensführung garantiert aber bei den meisten internen Prozessen und Entscheidungen jene Basis für Handlungssicherheit, die notwendig ist, um sehr konsequent im Sinne von erkannten Zukunftsperspektiven zu entscheiden. Tendenzen früh zu erkennen ist wichtig, um ebenso frühzeitig entsprechende Weichen für die eigenen Aktivitäten zu stellen. Mit Entwicklungstendenzen im Automobilbau beschäftigen sich zahlreiche Fachleute [4-16]. Bis 2010 soll z. B. das Gewicht um 17% oder durchschnittlich 250 kg je Fahrzeug abnehmen [17].

Bei genauerer Betrachtung des Umfeldes, in dem sich Automobilhersteller heute bewegen, lässt sich unschwer erkennen, dass sich ein Spannungsfeld aufgebaut hat, das wegen seiner Komplexität neue Produktdefinitionen zunehmend erschwert. Argumentationen kreisen um die Kernthemen Kraftstoffverbrauch, Emissionen, Geräusch und Fahrspaß auf der einen Seite und schaffen Diskurse zu den Forderungen bezüglich Kosten, Produktivität und Markt auf der anderen Seite. Stichworte wie Sicherheit, First-to-Market und viele andere Aspekte verschärfen die Situation. Die Motorenentwickler sind bemüht, im Sinne der Weiterentwicklung,

hohe Leistungsdichte mit immer niedrigeren Kraftstoffverbräuchen und noch geringeren Emission in immer leichtere und wartungsärmere Motoren zu installieren. Dabei stehen die Motorenfachleute unter dem Zwang, die Entwicklungszeiten zu verkürzen, den Kostenanstieg zu bremsen und die zunehmende Komplexität zu meistern.

Die Flugzeuge und die Rennmotoren waren immer die ersten Träger von neuen Werkstoffen, Konstruktionen und Herstellungstechnologien. Im Bild 4 sind Beispiele für sehr dünnwandige Gussstücke – Zylinderköpfe für Rennmotoren (sehr leichte Konstruktion) – mit extrem hohen mechanischen Belastungen (durch sehr effektive Turbotechnik), bei hohen Temperaturen (sehr hohe Drehzahl) dargestellt. Sehr oft dauerte es auch Jahrzehnte, bis sich die neuen Gedanken und Verfahren in die Serienproduktion übertragen ließen. Das gilt hauptsächlich für Mehrventil- und aufgeladene Motoren, die heute zum Standard in Serienautos gehören.

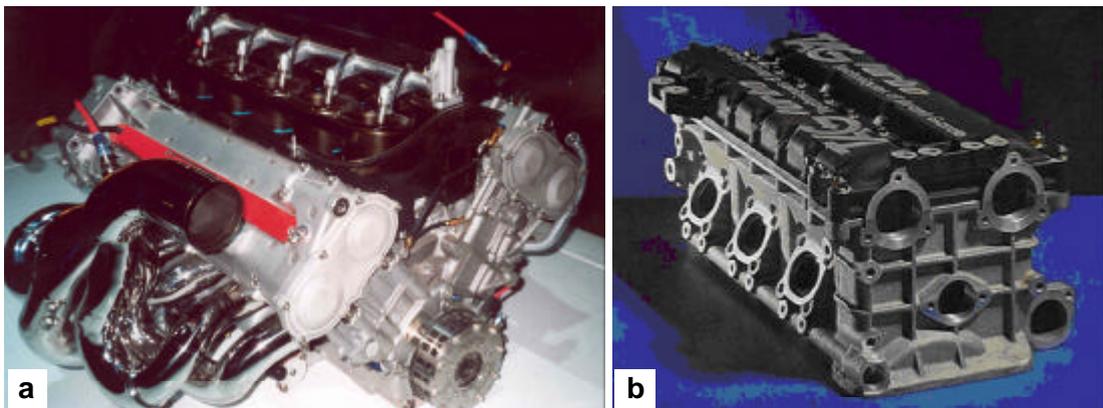


Bild 4 F1 Ferrari Motor V10 (a) und Porsche/TAG-Heur Zylinderkopf mit Kopfhaube des Turbomotors für McLaren (b)

Im Bild 5 sind die Entwicklungsschwerpunkte der zukünftigen Motoren dargestellt. Sowohl der thermische als auch der mechanische Wirkungsgrad der Aggregate steigt weiter. Dafür sorgen höhere Zünddrücke, mehr Drehmoment bei niedrigeren Drehzahlen, Gewichtseinsparungen durch Leichtbau und die Reduzierung der Reibungsverluste [18]. Unmittelbare Begleiterscheinungen sind verringerte Baugrößen bei den Komponenten, deren stärkere mechanische und thermische Verformung und eine insgesamt steigende Leistungsdichte mit wachsenden Belastungen. In vielen Bereichen stoßen bisher gebräuchliche Werkstoffe an ihre Leistungsgrenzen und müssen entweder abgelöst oder optimiert werden. Teilweise lassen sich auch bisher nicht genutzte Potenziale einzelner Werkstoffe ausschöpfen.

Eine große Zahl dieser Zielsetzungen der modernen Motorenentwicklung ist bereits durch das Leistungspotenzial konventioneller, bekannter Werkstoffe erfüllbar, wenn die Möglichkeiten konstruktiver Gestaltung, moderner Herstellungs-, Bearbeitungs- und Behandlungstechnologie konsequent genutzt werden. Die große Teilevielfalt mit unterschiedlichen und komplexen Beanspruchungsmechanismen sowie neue Anforderungen des Motorenbaues sind jedoch nach wie vor für die Nachfragen nach werkstofftechnischen Innovationen bestimmend.

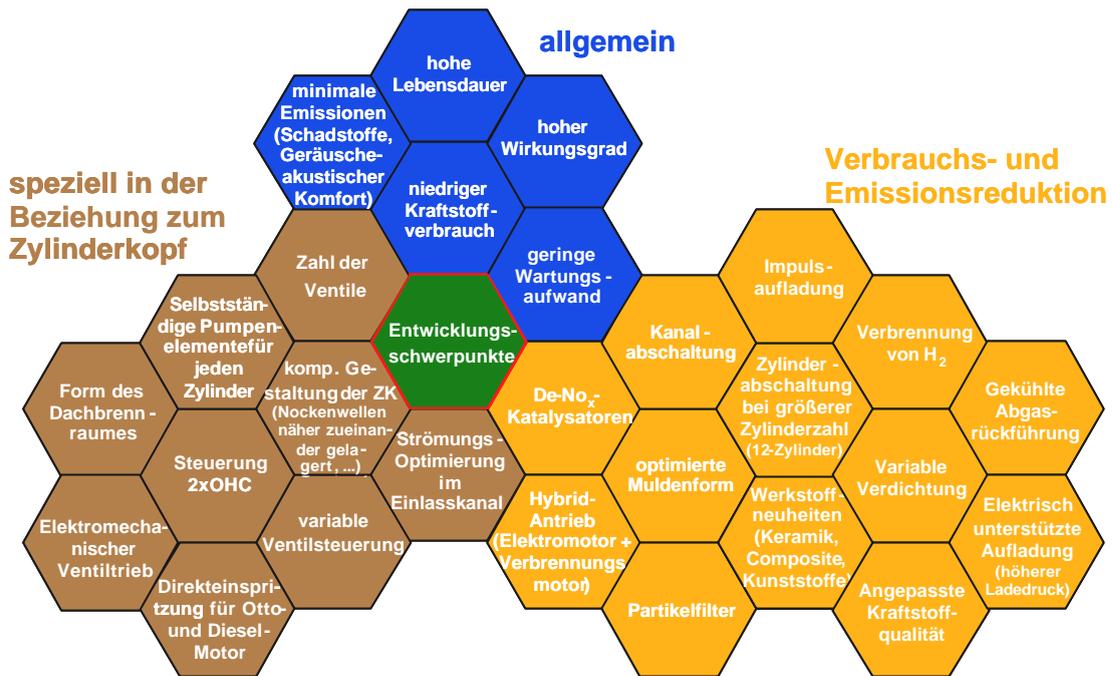


Bild 5 Entwicklungsschwerpunkte der zukünftigen Motoren

2 Der Zylinderkopf – ein sehr kompliziertes und hoch beanspruchtes Gussteil

Bei der Realisierung von Forschungsarbeiten ist sehr oft eine Zusammenarbeit zwischen Universität und Industriepartnern erforderlich. Wünschenswert ist es, wenn die Aufgabenstellung von dem Industriepartner initiiert wird, so dass eine praxisnahe und zielführende Forschung von ihm unterstützt und gefördert wird. Gleichzeitig erleichtert dies die Umsetzung der Forschungsergebnisse in die betriebliche Praxis.

Ein Zylinderkopf in der üblichen Form ist wirtschaftlich nur durch Gießen herstellbar, weil nur damit der Wasserraumkühlbereich formbar ist. Zur Herstellung des Wasserraumkühlbereiches, der eine sehr komplizierte und filigrane Form hat, werden Sandkerne eingesetzt, die nach dem Abguss einer thermischen Degradation unterliegen und relativ einfach aus dem Gusstück entfernbar sind. In der letzten Zeit werden in Zylinderköpfen Drall-Einlasskanäle eingesetzt, die ebenfalls nur mit Sandkernen herstellbar sind. Der Zylinderkopf ist ein repräsentatives Bauteil für das Kokillengießen – allein im Fachbuch „Kokillen für Leichtmetallguss“ von Schneider [19] ist er elfmal als ein Beispiel dargestellt.

Im Bild 6 ist ein Zylinderkopf mit den Abbildungen aller sechs Seitenansichten, sowie den für die jeweilige Seite üblichen Bezeichnung, dargestellt. Die Ventile dieses Zylinderkopfes werden durch Rollenschlepphebel angetrieben. Die Einlasskanäle haben immer einen größeren Durchmesser als die Auslasskanäle, um eine möglichst schnelle Füllung mit Brenngas zu gewährleisten. Die Untersuchungen in der vorgelegten Arbeit waren auf diesen Zylinderkopf und seine Fertigung gerichtet.

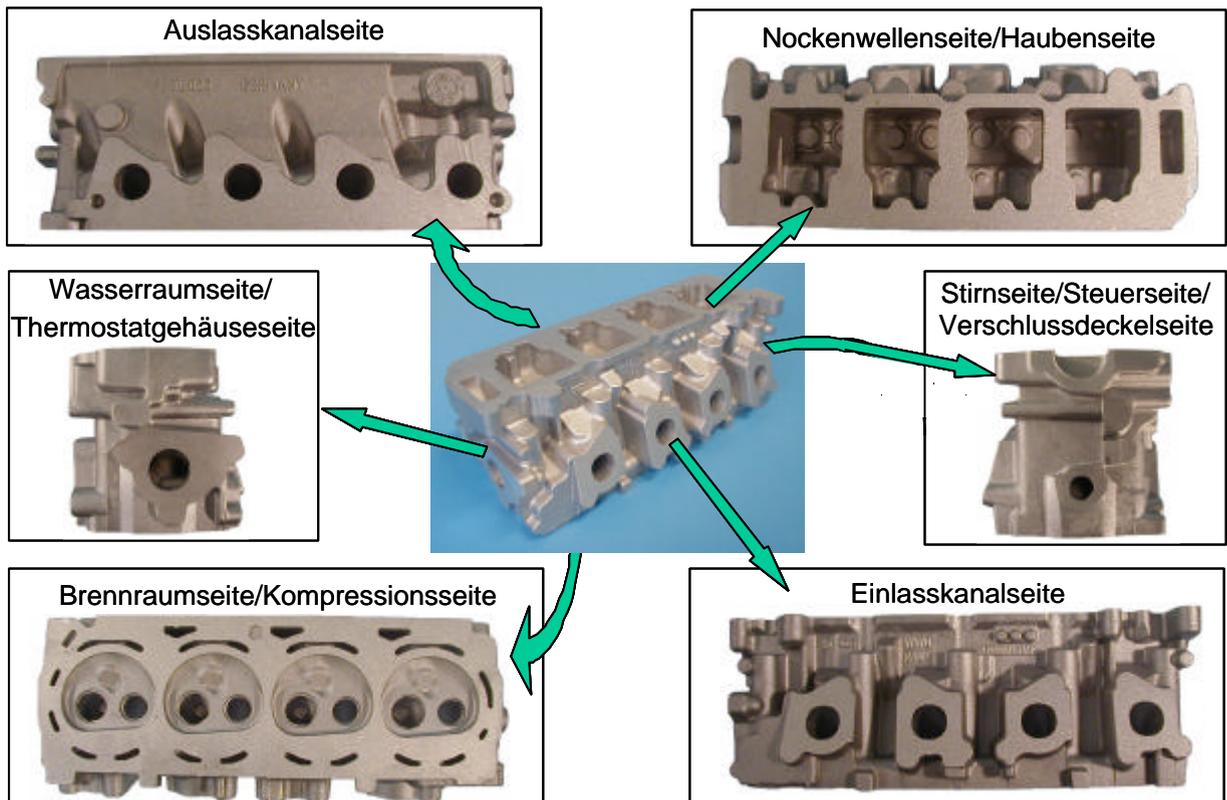


Bild 6 Bezeichnung der Ansichten eines Zylinderkopfes

2.1 Funktion des Zylinderkopfes im Motor

Die Berechnung, Auslegung und Gestaltung des Zylinderkopfes ist bei der Motorenentwicklung von großer Bedeutung. Der Zylinderkopf bestimmt, wie sonst kaum eine andere Baugruppe, maßgeblich die Eigenschaften eines Motors im Hinblick auf das Betriebsverhalten. Der einteilige Leichtmetall-Zylinderkopf ist einer der komplexesten und gleichzeitig höchst beanspruchten Bauteile eines Verbrennungsmotors. Je nach Auslegungsphilosophie eines Motors werden deshalb auch unterschiedliche Konstruktionskonzepte angewandt. Zylinderköpfe dienen zum Verschließen der Arbeitszylinder von Brennkraftmaschinen und sind pro Zylinder mit jeweils mindestens einem Einlasskanal und einem Auslasskanal zum Einlass bzw. zum Auslass eines Gasstroms in einem im Zylinder begrenzten Brennraum versehen. Die Zusammenfassung der Funktionen des Zylinderkopfes stellt das Bild 7 vor.

Die Kompliziertheit von neuen Motoren beeinflusst direkt die Konstruktion von Zylinderköpfen und damit ihrer Herstellung. Neuentwicklungen führen zu einer starken Erhöhung der geometrischen Komplexität der Bauteile und stellen damit hohe Anforderungen an den zum Einsatz kommenden Werkstoff und die dazugehörigen Herstellverfahren. Ein repräsentatives Beispiel ist ein kompakter 5-Zylinder Zylinderkopf mit V-förmiger Anordnung der Zylinder.

Vierventil- und Fünfventiltechnologie pro Zylinder, optimierte Geometrie und Anordnung von Einlass- und Auslasskanälen, vollvariable Ventilsteuerung und direkte Einspritzung bei Diesel- und Benzinmotoren sind schon normale Fachbegriffe für die Motorentechnik von in Großserien hergestellten PKW [20-25].

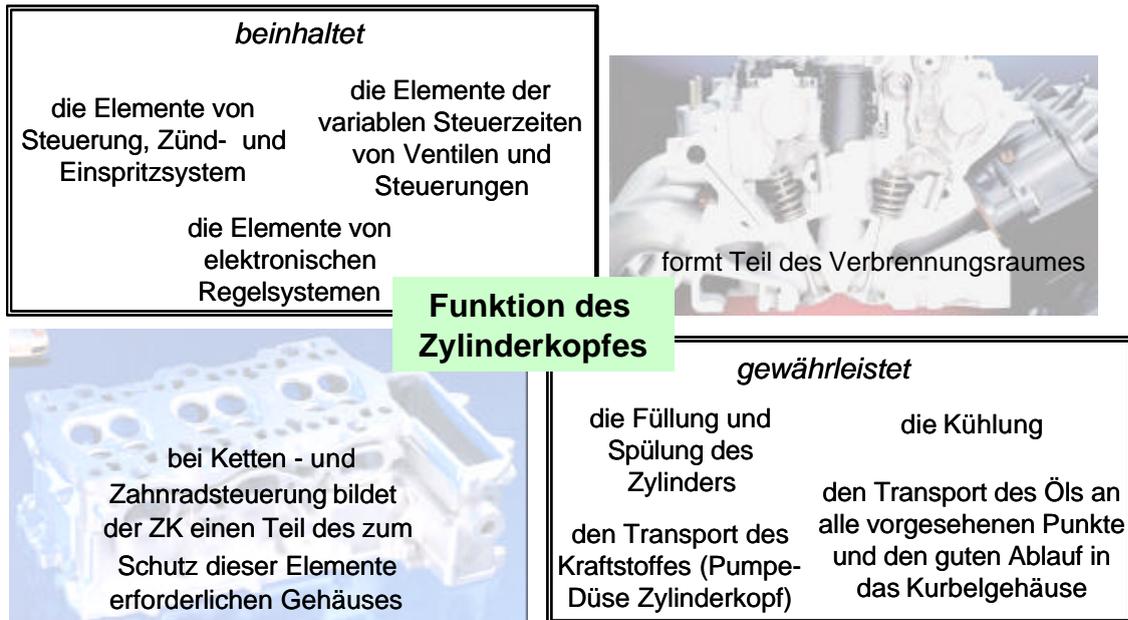


Bild 7 Funktion des Zylinderkopfes

Bei der Produktentwicklung werden weiterhin betrachtet:

- max. Ventilhub und -durchmesser, Öffnungswinkel, Ventilwerkstoff, Ventilsitzwerkstoff,
- die Kanalgeometrie {Drall/Tumble} (Bild 8a),
- Wassermantelausführung (Bild 8b),,
- Brennraumaufteilung,
- Akustik, Schwingungen,
- Ölkreislauf,
- Fertigbarkeit.

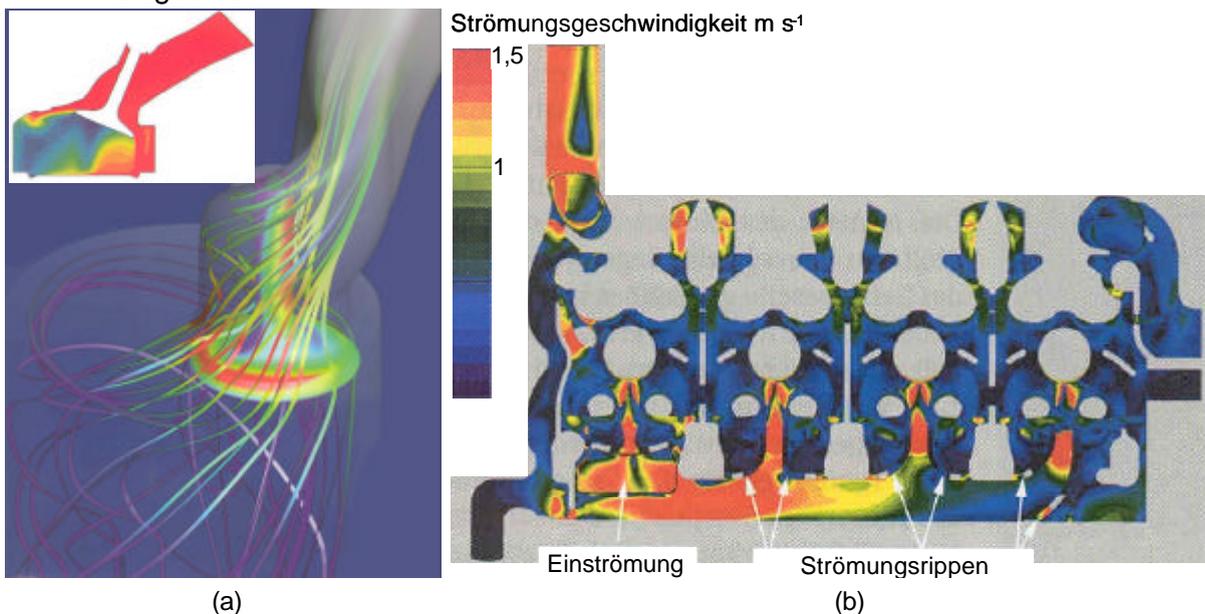


Bild 8 Virtuelle Aggregatentwicklung – die Ladungsbewegung im Brennraum beeinflusst durch Kanalgeometrie a) und Strömungssimulation im Wassermantel b) [26,27]

2.2 Anforderungen an Zylinderköpfe

Als selbstverständlich wird heute angesehen, dass Metallguss-Motorteile über die Dauer des vorbestimmten Motorlebens nicht durch eine Materialermüdung ausfallen, die sich durch Risse äußert. Diese Hauptfunktion ist durch gute Werkstoffkenntnisse und Tests immer besser zu erfüllen. Damit haben sich im Laufe der Zeit die Schwerpunkte in der Entwicklung erweitert, nämlich von der Dauerfestigkeit in den Werkstoffquerschnitten bis zu den Anforderungen an **abdichtende Oberflächen**, Bild 9. Diese Anforderung ist besonders beim Zylinderkopf von höchster Bedeutung.

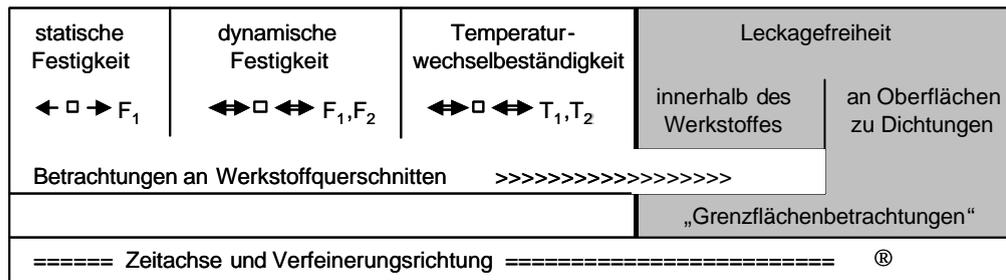


Bild 9 Verfeinerung der Anforderungen

Durch die effektive Wasserkühlung des Zylinderkopfes soll ein sicherer Betrieb auch bei hohen Belastungen ermöglicht werden. Daher werden die Wasserraumkerne mit Hilfe von strömungstechnischen Simulationen ständig weiter optimiert, Bild 8b. Durch die Querdurchströmung werden in dem kritischen Bereich – im Steg der Auslassventile – die Temperatur um zirka 30°C gegenüber einem längsdurchströmten Zylinderkopf reduziert, die Temperaturunterschiede der Zylinder abgebaut und insbesondere der Druckwiderstand des Gesamtmotors um etwa 60% reduziert. Die effektive Wärmeabfuhr ist bei dünnwandiger Konstruktion gesichert, gleichzeitig stellt sie aber hohe Anforderungen an die Gießtechnologie, da Undichtheiten zu 100% ausgeschlossen werden müssen. Die Dichtheit wird auch in bearbeiteten Kanälen geprüft. Im Zylinderkopf Pumpe-Düse wird der Kraftstoff durch die Kanäle direkt im Bauteil transportiert. Diese Kanäle werden ebenfalls mit einem Überdruck von 0,2 MPa auf die Dichtheit geprüft.

An die gegossenen Zylinderköpfe werden folgende Anforderungen gestellt:

- niedrige Masse,
- Dichtheit im Wasserraum- und Ölraum (100% Kontrolle – Lecktest; 0,2 MPa Testdruck),
- gewünschte Form (Konturen, z. B. zwischen Wasserraum und Einlasskanal Wanddicke bis 2,5 mm)
- Werkstoffwiderstandsfähigkeit gegenüber hohen mechanischen Belastungen durch:
 - die Vorspannkräfte der Zylinderkopfschrauben, Bild 10,
 - die puls. Gaskräfte im Brennraumbereich und in den Auslasskanälen, Bild 10,
 - die thermischen Spannungen (Temperaturgradienten im ganzen Kopf einschließlich wechselnde thermische Belastung), Bild 11,
 - Restspannungen aus dem Herstellungsprozess,
- Oberflächenqualität in den Einlass- und Auslasskanälen (durch die Oberflächenrauheit der Kanalkerne gegeben, Anforderung für Einlasskanal $R_z = 70 \div 100 \mu\text{m}$; Tendenz $50 \mu\text{m}$),
- bearbeitete Flächen ohne Ungängen – gesicherte Dichtheit nach der Bearbeitung in Wanddicken bis zu 2 mm.

Im Bild 10 sind die beanspruchten Bereiche eines Zylinderkopfes dargestellt. Eine der schärfsten Beanspruchungen des Werkstoffes für Zylinderköpfe stellen die durch Temperaturwechsel und Temperaturdifferenzen im Ventilsteig verursachten Spannungen dar. Während des Betriebes des Motors treten im Ventilsteig, im Verhältnis zu den anderen Teilen des Verbrennungsraumes sehr hohe Temperaturen auf. Der Ventilsteig möchte sich ausdehnen, wird aber vom wassergekühlten Zylinderboden daran gehindert. Der erfolgreiche Einsatz von Al-Gusswerkstoffen beim Auftreten von Temperaturwechseln, wie bei Zylinderköpfen, hängt daher von der Fähigkeit des Werkstoffes ab, wiederholte Temperaturwechsel zwischen Raumtemperatur und etwa 290°C zu überstehen. Die Fähigkeit des Werkstoffes, Temperaturwechselbeanspruchung zu ertragen, ist eine Funktion der Festigkeit bei Raumtemperatur und bei erhöhten Temperaturen, der Kriechfestigkeit sowie der Zeitfestigkeit.

Die Motorentwickler stellen ständig höhere Anforderungen nicht nur im Brennraumbereich, sondern auch im Nockenwellenlagerbereich. Speziell der Schraubenauslauf im Aluminiumgewinde (Bild 10 – grüne Punktwolke) ist stark ermüdungsbruchgefährdet und oftmals Ausgangspunkt für in die umgebende Aluminiumstruktur verlaufende Schwingungsbrüche. Die High-Cycle-Fatigue-Sicherheitsanalyse [13] dient zur Ermittlung der lokalen Sicherheit gegen Ermüdungsbruch. Eine Verbesserung der Materialeigenschaften im Nockenwellenbereich ist bei der Positionierung direkt unter den Speisern sehr problematisch.

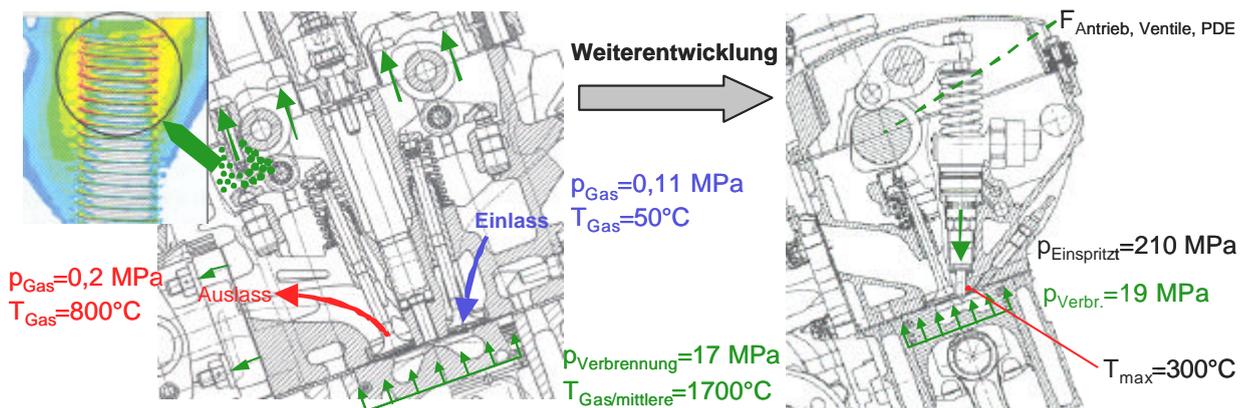


Bild 10 Art und Lokalisierung der mechanischen und thermischen Beanspruchung des 4-Ventil-Zylinderkopfes mit Rollenschlepphebel für einen 6-Zylindermotor TDI und des 2-Ventil-Zylinderkopfes Pumpe-Düse für einen 4-Zylindermotor [27,28]

Maßtoleranzen an den Zylinderköpfen werden durch den Automobilproduzenten vorge-schrieben. Beispielhaft sind die Maßtoleranzen für einzelne Bereiche eines in Großserie her-gestelltem Zylinderkopfes:

- Einlasskanalöffnung $\pm 0,4$ mm,
- Brennraumhöhe $\pm 0,15$ mm,
- bei Wandstärke 3,5 mm +0,5 / -1 mm.

Die allgemeine Toleranz für Kokille und für Kerne richtet sich nach DIN.

Tabelle 1 stellt die erreichbaren Drücke und Temperaturen beim Motorbetrieb dar. Mit neuen Technologien, hauptsächlich bei Dieselmotoren, wie Common-Rail und Pumpe-Düse, werden diese Werte extrem gesteigert. Wie aus Gleichung (1) für die Leistung eines Motors ersichtlich ist, spielt neben der Drehzahl auch der mittlere effektive Druck eine große Rolle.

$$P = \frac{V_H p_m n}{1200} \quad (1)$$

Somit sind die Bemühungen von Motorentwicklern klar.

Um so den Druck zu erhöhen, ist es notwendig, den Wirkungsgrad des Verbrennungsprozesses und selbstverständlich den Einspritzdruck zu erhöhen. Der Zylinderkopf wird nicht nur durch die größeren Verbrennungsdrücke im Brennraumbereich belastet, sondern er bildet einen Träger der Einspritzelemente. Diese feinmechanischen Baugruppen widerstehen den hohen Drücken nur wegen ihres Einbaus in den Zylinderkopf.

Tabelle 1 Spitzendrücke und –temperaturen an PkW Otto- und Dieselmotoren [28]

Parameter	Ottomotor	Dieselmotor
Verbrennungsdruck [MPa]	bis 6	bis 19
Effektiver Mitteldruck [MPa]	bis 1,74	bis 2
Temperatur (an Wänden vom ZK bei der Abkühlung) [°C]	bis 300	bis 280
Abgastemperatur [°C]	bis 1000	bis 800

Erfahrungsgemäß sind kritische Zonen bezüglich des Werkstoffverhaltens und der Bauteilbelastung bekannt, die die maximale Beanspruchung des Bauteils darstellen, Bild 11. Auch die Simulationen zeigen, dass die höchsten Belastungen im heißen Bereich der Brennraummitte auftreten. Die hohen Materialtemperaturen führen dort zu Spannungswerten, welche die Fließgrenze des im heißen Zustand weniger festen Materials lokal überschreiten. Infolge der hohen thermischen Druckspannungen, insbesondere am Austritt der Glühstiftbohrung, kommt es zu deutlichen plastischen Dehnungen. Nach der Abkühlung finden sich in der heißgestauchten Zone erwartungsgemäß auch die höchsten Zugspannungswerte. Diese Zugspannungen sind hier so hoch, dass die Streckgrenze des Werkstoffes wiederum erreicht wird und ein erneutes Plastifizieren auftritt. Die Folge ist eine im Motorbetrieb zyklisch wiederkehrende plastische Dehnungsamplitude, welche die Voraussetzung für den Low-Cycle-Versagensmechanismus darstellt.

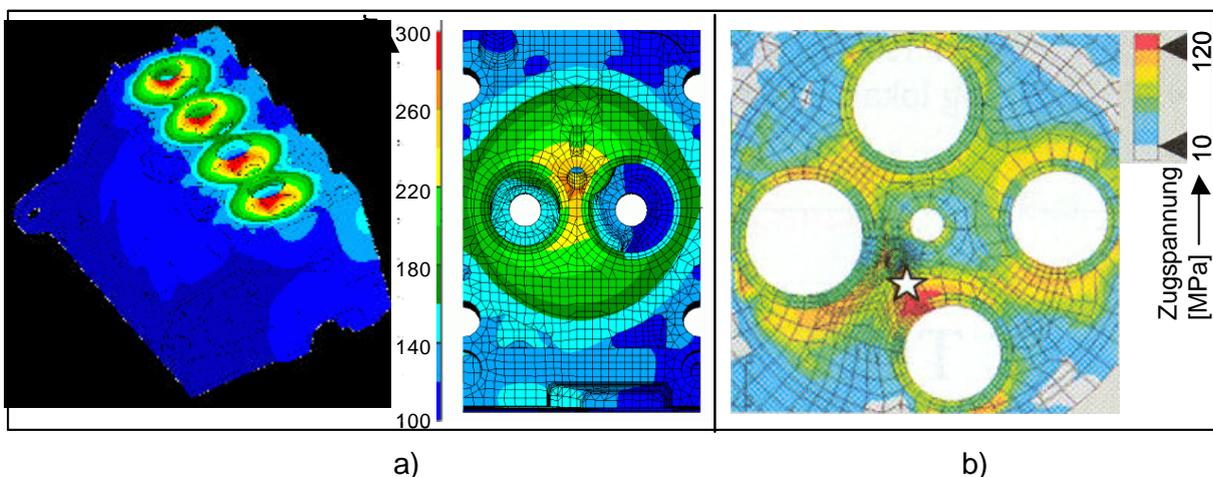


Bild 11 Temperaturbelastung im Brennraumbereich eines 2-Ventil Zylinderkopfes (a) und Spannungszustand am 4-Ventil Zylinderkopf Pumpe-Düse (b) [29]

Bei bestimmten Varianten der direkten Benzineinspritzung ist die Situation noch kritischer, weil gerade die Einspritz- oder Zündungselemente sehr nahe positioniert sind. Aus diesen Gründen werden an das Gussstück im Brennraumbereich sehr hohe Anforderungen gestellt. Formen zur Herstellung von solchen Teilen müssen im Bereich des Brennraumes bei der Erstarrung intensiv gekühlt werden, um das Gefüge so zu beeinflussen, dass diesen hohen Anforderungen entsprochen werden kann. Durch die intensive Kühlung bildet sich eine feine Struktur, die durch einen niedrigen Dendritenarmabstand charakterisiert wird und gute Festigkeitseigenschaften erwarten lässt.

Eine feine Struktur ist auch durch den Eintrag einer Energie mit hoher Dichte erreichbar. So ist nach dem Patent [30] mit Laserenergie der Bereich zwischen Einlass- und Auslassöffnung behandelbar. Nach dem schnellen Wiederaufschmelzen erstarrt der geschmolzene Abschnitt in einer Richtung von der Matrix zur Oberfläche.

2.3 Werkstoffe für Zylinderköpfe

Durch Substitution des Werkstoffes Eisen durch Aluminium werden bei einem Zylinderkopf und einem Motorblock eines Mittelklassewagens ca. 30-35 kg Gewicht eingespart [6,31,32].

In den achtziger Jahren hat sich Aluminium als ein Werkstoff zur Großserienherstellung von Zylinderköpfen für PKW durchgesetzt. Zurzeit liegt der durchschnittliche Anteil an Aluminiumguss im PKW um 90 kg [4]. Der Gesamtverband der Deutschen Automobilindustrie rechnet mit einer Verdoppelung dieses Anteils bis 2008 [1]. In den Ländern der EU werden ca. 90% aller Zylinderköpfe bzw. ca. 50% aller Verbrennungsmotoren aus Aluminium hergestellt. In den USA werden immer noch 50% der ZK aus Eisenlegierungen gegossen. Das kann man leicht erklären - die Eisengießereien haben eine starke Lobby in den Automobilkonzernen und der Anteil an großvolumigen Motoren ist deutlich größer als in Europa. Man muss aber nebenbei konstatieren, dass die amerikanischen Eisengießereien sehr modern ausgerüstet sind und den Kunden qualitative Gussstücke für sehr günstige Preise liefern, was sie gegenüber der Konkurrenz mit Aluminiumgussstücken sehr attraktiv macht. Die Konstrukteure optimieren in Zusammenarbeit mit den Technologen die Konstruktion so, dass das Gewicht von Gusstücken drastisch sinkt. So ist z. B. aus dem Werkstoff EN-GJL-250 in Großserie das Zylinderkurbelgehäuse für den niedrigvolumigen Motor Ecotec von Opel gegossen worden. In [33] ist erwähnt, dass die Aluminiumausführung um 80 bis 120% teurer wird. Das heißt, dass auf dem Gebiet der Zylinderkurbelgehäuseherstellung die Aluminiumgießereien immer noch die Konkurrenz der Eisengießereien erwarten können. Die Zylinderkopfproduzenten haben sehr oft im Herstellungsprogramm auch die Motorblöcke, daher ist diese Situation hier angeführt.

Die Hauptvorteile gegossener Bauteile aus Aluminiumlegierungen gegenüber Eisenlegierungen sind:

- niedrige Dichte der Al-Legierungen,
- erheblich niedrigere Gießtemperatur (somit ist das Gießen in metallischen Dauerformen möglich) mit niedrigen Schmelzkosten,
- ausgezeichnete metallische Bearbeitbarkeit,
- ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit.

Höhere Drehzahlen bei Benzinmotoren erfordern eine bessere Wärmeabfuhr aus dem Brennraum. Die hohe Wärmeübertragung des Aluminiums macht diese Leichtmetallausfüh-

rung zur idealen Basis heutiger und künftiger Motorgussteile. Dazu trägt die ständig optimierte Konstruktion des Wasserraumbereiches im Zylinderkopf bei. Es treten aber auch Nachteile auf:

- niedrigere mechanische Eigenschaften,
- schlechtere Dämpfungseigenschaften,
- hohe Neigung zur Oxidation beim Schmelzen.

Es sind eine ganze Reihe von Al-Legierungen bekannt (Tabelle 1 der Anlage). Zur Auswahl stehen auch Legierungen mit höheren mechanischen Eigenschaften. Diese Legierungen sind aber meist schlecht gießbar, was für dünnwandige Gussstücke, wie Zylinderköpfe, sehr ungünstig ist. Zum Gießen von dünnwandigen Teilen ist ein sehr hohes Formfüllungsvermögen erforderlich. Bei den Legierungen mit breitem Erstarrungsintervall und mit größerem Anteil von intermetallischen Phasen verschlechtern sich die gießtechnologischen Eigenschaften. Die mechanischen Eigenschaften in Tabelle 1 der Anlage sind zwar den Herstellungsverfahren zugeordnet, was aber nur einen groben Orientierungswert angibt. Diese DIN-Werte wurden an gegossenen Zugproben gewonnen. Die letztendlichen Eigenschaften des Gussstückes sind nicht nur von lokal unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen abhängig, sondern auch von weiteren Faktoren des Gießprozesses; hauptsächlich von der Reinheit der dem Hohlraum der Gießform zugeführten Schmelze und dem resultierenden Porositätsgrad des Gussstückes.

Die Automobilkonzerne und die Automobilindustriezulieferer entwickeln neue Werkstoffe und optimieren dazu die Wärmebehandlung mit dem Ziel der Gewinnung von höheren mechanischen Eigenschaften [34]. So benutzte z. B. FIAT für seine Dieselmotoren die interne Legierung $AlSi9Cu1Mg0,4Fe0,25Zn0,1$ [35] oder VAW die patentierte Zylinderkopfliegierung $AlSi7Ni0,5Fe0,4Mg0,4Cu0,35Mn0,3Zn0,1Ti0,1$ [36]. Die für die Herstellung von Zylinderköpfen relativ exotische Legierungen $AlMg5Si$ mit Zugabe von Cu und $AlMgSi1Mn$ erwähnen [37] in ihrem Beitrag. Für die luftgekühlten Zylinderköpfe ist es notwendig warmfeste Legierungen einzusetzen, wie z. B. $AlCu5NiCoMnSbZrTi$. Die Literaturstelle [38] beschreibt die Anforderungen an die Struktur, die hohen mechanischen Eigenschaften auch bei höheren Temperaturen aufweisen soll. Hauptsächlich sind es feine, hoch dispersive und in günstiger Morphologie erfolgte Abscheidungen von intermetallischen Phasen. Die Phasen, die sich während der künstlichen Aushärtung bilden, sollen bei höheren Temperaturen sehr schwer koagulieren. Bedeutend für die Eigenschaften sind geringe Abmessung und eine große Menge von Teilchen der festen Lösung und die Zusammensetzung, die Eigenschaften und die Art der Abscheidung von Phasen, die das Eutektikum bilden.

2.4 Allgemeine Bemerkung zum Zylinderkopf

Die Entwicklung im Motorenbau ist dynamisch. Sie fordert eine starke Flexibilität der Gießereien und stellt an die Gießtechnologie hohe Anforderungen. Der Lebenszyklus einer Variante ist durch die effektive virtuelle Entwicklung von neuen Teilen bedeutend kürzer.

Der Zylinderkopf ist ein repräsentatives Bauteil für das Kokillengießen von Aluminiumlegierungen und einer der kompliziertesten und vielseitig beanspruchten Teile im Motor. Die dünnwandige Konstruktion des Zylinderkopfes ist zyklischen thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. Er soll in seinen Kanälen und bearbeiteten Flächen dicht sein. Die

mechanische Belastung steigt bei neuen Motoren auch im Nockenwellenbereich, was wiederum höhere Anforderungen an die Gießtechnologie stellt.

Es steht eine ganze Palette von konventionellen Werkstoffen zur Verfügung, aber auch neu entwickelte, welche sich durch höhere Kosten oder schlechtere Gießbarkeit nicht durchsetzen können. Um Werkstoffeigenschaften im oberen Normbereich zu erreichen, ist eine ständige Optimierung der Gießtechnologie erforderlich.

3 Qualitätsbetrachtungen bei der Fertigung von Zylinderköpfen

Ambos u.a. [39] schreiben über die strenge Bewertung von Lieferanten, bei der neben den Anforderungen an eine gleichmäßige hohe Qualität auch Forderungen hinsichtlich einer ganzen Reihe von Kriterien formuliert werden. So werden z. B. genannt:

- Reaktion auf Probleme (Korrekturmaßnahmen) und Effektivität der Fehler-Ursachenanalyse,
- Vorschläge für Produkt- und Prozessverbesserungen.

Z. B. ist die sogenannte VW-Liga ein Werkzeug zur Bewertung von Lieferanten des Konzerns, mit dem Ziel, den gegenseitigen Wettbewerb zu unterstützen, indem erreichte Qualitätsergebnisse offen präsentiert werden.

Die Ursachenanalyse und die Prozessverbesserung sind heute Grundlage für den wirtschaftlichen Erfolg einer Gießerei. Sie erfordern Anwendung und Verknüpfung **multidisziplinärer Wissenschaftsgebiete**. Das traditionelle Modell (Bild 12) zur Vorgehensweise bei der Ursachenforschung von Gussfehlern reicht oftmals nicht mehr aus. Die Ermittlung von Einflussgrößen ist ein wesentlicher Bestandteil, der sehr umfangreiche und gründliche Untersuchungen erfordert. Die Ursachenforschung ist damit gleichzeitig Basis für die Prozessbeherrschung. Nur mit der gründlichen Untersuchung des Ablaufs aller einzelner Prozessschritte ist es möglich die Einflussgrößen zu erkennen und zu definieren, d. h. jedoch noch nicht, dass damit für die einzelnen Prozessabläufe die optimalen Werte der einzelnen Parametern festgestellt sind. Sehr oft ist sogar das Endprodukt schlecht durch einzelne Eigenschaften, bewertbar. So ist z. B. die Porosität für die Bewertung der Qualität von Gussteilen von großer Bedeutung. Bis heute gibt es aber keine allgemeingültige Definition des Porositätsgrades, die auf komplizierte Großserienteile wie Zylinderköpfe angewendet werden kann. Ebenso sind Ursachen und Einflussgrößen auf die Porosität ungenügend erforscht.

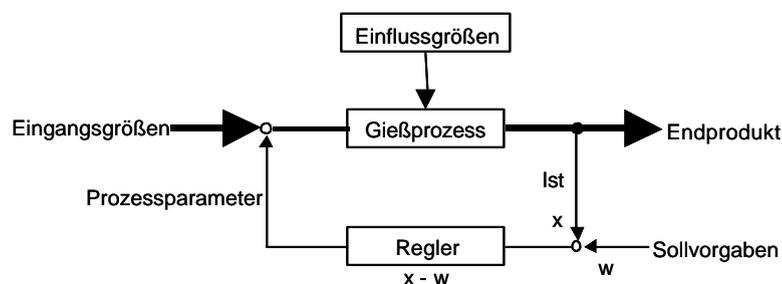


Bild 12 Vorgehensweise bei der Ursachenforschung von Gussfehlern [39]

Das Ziel eines erfolgreichen Unternehmens ist die Null-Fehler-Produktion, die die Erprobung und Umsetzung einer Vielzahl von Detaillösungen erfordert. Der Erfolg dieser Maßnahmen

ist bestimmt von der Innovationskraft und der Lernfähigkeit eines Unternehmens. Diese Charakteristika lassen sich umfassend durch eine systematische Qualitätsplanung und -lenkung beeinflussen [40], Bild 13. Prozessketten zur Null-Fehler-Produktion verfügen hierzu über:

- eine kurzfristige, dezentrale und
- eine langfristige prozesskettenorientierte Qualitätsplanung und -lenkung [41].

Aufgabe der Prozessketten-Qualitätslenkung ist die Analyse von Abweichungsursachen in der Prozesskette.

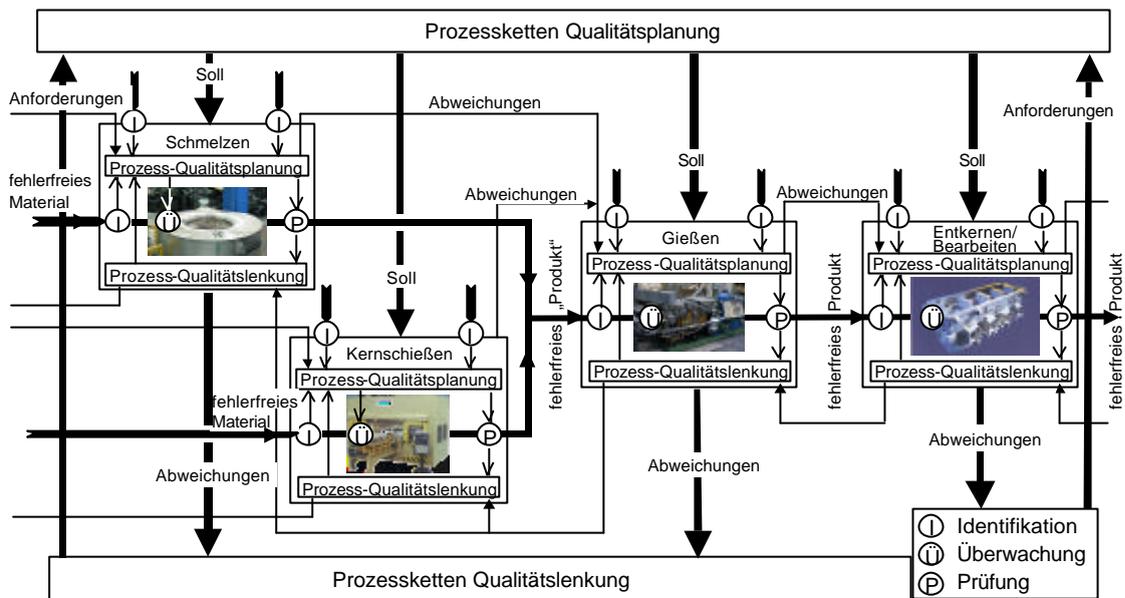


Bild 13 Null-Fehler-Produktion in Prozessketten mittels Qualitätsplanung und -lenkung

Ein anforderungsgerechtes Gussteil wird nur dann erreicht, wenn das eingesetzte Vormaterial und die Schmelz- und Gießbedingungen gewährleisten, dass Einflussfaktoren wie Ausscheidungsphasen, Oxideinschlüsse und der Wasserstoffgehalt kontrollierbar sind [42,43]. Beim Kokillengießen von hochbelasteten, dünnwandigen und dichten Teilen ist in jedem Fall zu empfehlen, alle schädlichen Effekte zu vermeiden oder mindestens zu minimieren. Damit ist gemeint:

- Rücklauf mit Spänen und Schmieröl streng separat umschmelzen,
- Rücklaufmaterial aus abgetrennten Gießsystemen muss unter besonderen Rahmenbedingungen umgeschmolzen werden, weil der Gießtumpel ein hohes Volumen von Oxiden im Verhältnis zum Gusstück beinhaltet,
- Metallreste von Putzarbeiten sollten nicht in den Kreislauf kommen,
- der Tiegel vom Warmhalteofen sollte vor jedem Umfüllen gereinigt werden,
- das Bad sollte vor der Freigabe zum Gießen immer präzise abgekrätzt (Krätze ist ein Gemisch von Metall, Oxid und Luft) werden [44].

Weitere Fehlerquellen nach [45] sind:

- zu langsames Einschmelzen,
- Nachsetzen von kaltem Metall,
- Berührung der Flamme mit dünnwandigem Kreislaufmaterial,
- hohe Schmelztemperatur,
- nicht geeignete Ofenauskleidung,

- schlechte Ofenwartung,
- Tiegelreaktion,
- Überveredelung.

Das Bild 14 zeigt schematisch die Eigenschaften und Parameter der Schmelze und die dadurch beeinflussten Qualitätskennwerte des Gussstückes. Den gewünschten Eigenschaften des Gussstückes müssen aber nicht nur die Parameter der Schmelze angepasst werden, sondern auch die Prozessparameter des Gießens, Erstarrens und Nachbehandelns. Unter Praxisbedingungen sind viele Prozessparameter schwer quantifizierbar. Nur der Prozessparameter Temperatur ist einfach messbar. In der Praxis ist es verbreitet den Wasserstoffgehalt der Schmelze zu überwachen. Diese Prüfungen sind wie in [46] beschrieben problembehaftet. Die Ergebnisse sind jedoch zum Zweck der Betriebsqualitätskontrolle genug aussagekräftig. Eine wirksame Entgasung garantiert aber noch nicht die Herstellung porenarmer Gussstücke, da die Schmelzen meist während des Abstehens oder durch Gieß- und Umfüllprozesse – verbunden mit einer Oxidanreicherung – wieder Wasserstoff aufnehmen können.

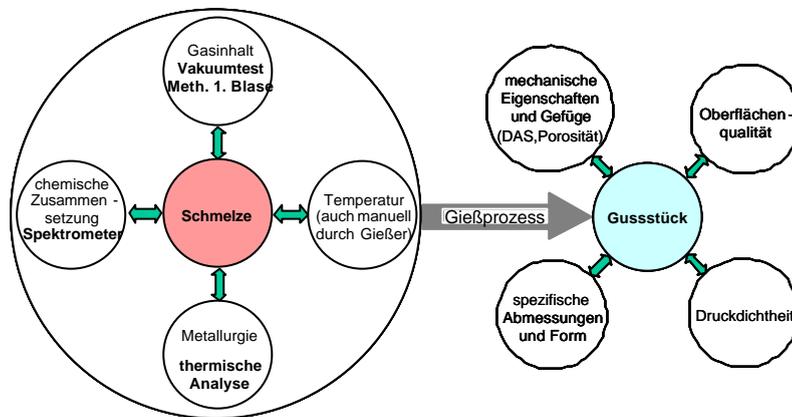


Bild 14 Beherrschte Schmelzequalität ist eine erforderliche Basis für den erfolgreichen Weg zu gewünschten Gussstückeigenschaften

Die Kerne und Formhohlräume sind nicht selten so ausgebildet, dass an bestimmten Stellen, so an Vorsprüngen, Kernspitzen, Querschnittsübergängen, Hinterschneidungen u.s.w. durch die Abkühlung und Erstarrung im Gussstück Bedingungen auftreten, die Spannungsspitzen, Verformungen und Instabilitäterscheinungen hervorrufen, während unmittelbar daneben wesentlich günstigere Verhältnisse vorliegen. Bei Zylinderköpfen ist somit oft der Werkstoffzustand an eng begrenzten Partien (z. B. Ventilstege) für die Haltbarkeit des Bauteils bestimmend [47]. Das Gussstück hat in Abhängigkeit von lokal unterschiedlichen Abkühlbedingungen auch unterschiedliche Eigenschaften, Bild 15. Neben den Abkühlbedingungen werden die Eigenschaften u. a. auch durch die Formfüllungsart, die Gleichmäßigkeiten der Formhohlraumfüllung, die Präparierung der Kokille und die Entlüftung beeinflusst.

Die Gefügeausbildung ist durch den DAS relativ einfach charakterisierbar. Zur Feststellung des DAS ist es notwendig, Proben aus dem Gussteil zu entnehmen und metallographisch zu präparieren. Zwischen DAS und mechanischen Eigenschaften ist ein direkter Zusammenhang feststellbar. Einfacher ist die Härte an gegossenen Bauteilen bestimmbar, welche ebenfalls in direktem Zusammenhang zu den mechanischen Eigenschaften steht. Daher sind die Werte von DAS und Härte Qualitätskriterien für die Abnahme von Gussteilen durch den Kunden.

nur bei Einhaltung aller optimaler Parametergrößen und gleichzeitiger Vermeidung von störenden Einflüssen erreichbar.

Einzelne Parameter können voneinander abhängen. Einflussgrößen können sich in ihrer Wirkung verstärken oder aufheben. Für die Optimierung des Prozesses ist es notwendig, Schritt für Schritt die einzelnen Phasen des Prozesses zu untersuchen und die gewonnenen Ergebnisse auszuwerten.

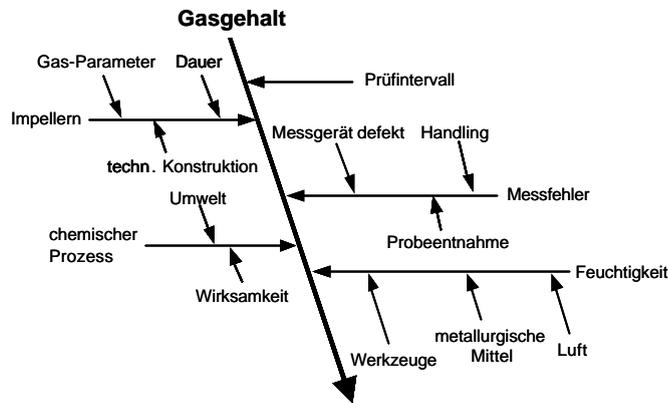


Bild 17 Detaillierung eines Ishikawa-Diagramms für den Gasgehalt von Al-Schmelzen

Im Bild 18 sind die Einflüsse auf die Gefügeausbildung und die Eigenschaften von Gussstücken dargestellt. Das Bild zeigt im Gegensatz zum Ishikawa-Diagramm teilweise die Wirkungsrichtung und interne Zusammenhänge von einzelnen Einflüssen.

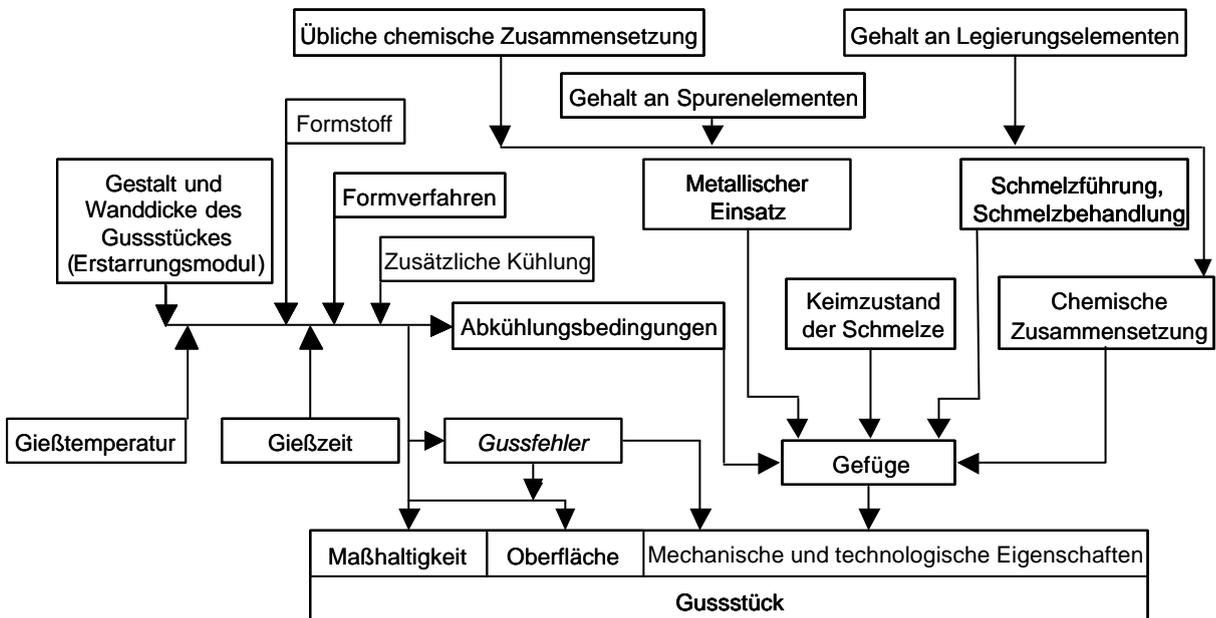


Bild 18 Einflüsse auf die Gefügeausbildung und die Eigenschaften von Gussstücken (in Anlehnung an [48])

3.2 Gussfehler

Ein Ziel ist die Null-Fehler-Produktion, d. h. alle geforderte Qualitätsparameter des Gussstückes auch unter den Bedingungen der Großserienfertigung einzuhalten. Der Nachweis erfolgt durch umfangreiche Prüfungen an den Erzeugnissen.

Schon direkt bei der Gussstückentnahme aus der Kokille wird jedes Gussstück visuell vom Gießer auf Fehler wie z. B. **Kaltschweißen**, **Sandstellen** und **Oberflächenqualität** (Schlichte-Funktion auf den Reibungsflächen und der Brennraumkontur) geprüft. Weiterhin wird die **Dichtheit** im Wasserraum- und Ölraumbereich kontrolliert (Lecktest) und mit Hilfe einer Bildverarbeitungstechnik die Einhaltung der **Maße und Toleranzen** geprüft.

Die stofflichen Eigenschaften am gegossenen Bauteil sind nur bedingt feststellbar. Die lokal unterschiedlichen Eigenschaften des Zylinderkopfes wurden schon im Kapitel 3 beschrieben. Die mechanischen Eigenschaften werden neben der chemischen Zusammensetzung durch eine Reihe von Gefügemerkmalen beeinflusst. Das Gefüge besteht in der Regel aus einer eutektischen Matrix mit eingelagerten Al-Mischkristallen. Weitere Legierungselemente bilden meistens harte intermediäre Phasen, die die mechanischen Eigenschaften verbessern. Die aushärtbaren Legierungen weisen gute mechanische Eigenschaften durch die Anwesenheit von Präzipitaten auf. Die Korngröße ist durch den relativ leicht messbaren Dendritenarmabstand charakterisierbar. Die mechanischen Eigenschaften werden negativ beeinflusst durch Inhomogenitäten im Gefüge, hauptsächlich durch Hohlräume und Einschlüsse. Weiterhin kann die Homogenität des Werkstoffes durch die bei der Erstarrung (Warmriss) oder bei der Abkühlung (Kaltriss) entstehende Risse gestört werden. Wie formuliert das Gießerei-Lexikon eine homogene Struktur? Ein homogenes Gefüge liegt vor, wenn es weder instabile Phasen oder Ausscheidungen noch Seigerung oder **Einschlüsse** enthält. Unter dem Begriff „homogen“ versteht man allgemein gleichartig, gleichmäßig oder aus Gleichartigem zusammengesetztes Gefüge. In dieser Arbeit sollen unter dem Begriff „Inhomogenität“ aber neben Gefügeungleichmäßigkeiten und Einschlüssen auch Fehler wie die **Porosität** einbezogen werden, die gleichfalls eine Störung der Struktur bewirken. Von großem Interesse ist die quantitative Auswertung des Gefüges auf Inhomogenitäten, auf die in Kapitel 3.3.2 eingegangen wird.

3.2.1 Porosität

Durch Schwerkraftgießen hergestellte Gussstücke weisen immer eine mehr oder weniger große Porosität auf. Die Porosität ist ein Sammelbegriff für das Auftreten von Poren [49]. Poren sind offene oder geschlossene **Hohlräume** im Gefüge. Man unterscheidet **Gasporen**, **Luftporen** und **Lunkerporen**. Feinporosität sind interkristalline Hohlräume im Gefüge, die nur schwer von Gasporosität zu unterscheiden sind.

In der Tabelle 2 sind Entstehungsursachen und Einflussparameter auf die Porosität aufgeführt. Im Rahmen dieses Vorhabens liegen die Schwerpunkte der Untersuchungen auf den in der Tabelle fett markierten Feldern.

Tabelle 2 Entstehungsursachen von Porosität in Gussstücken und ihre Beeinflussung durch die Fertigungsbedingungen [50]

Schwindung	Volumenvergrößerung	Endogene Gase	Exogene Gase
Konstruktive Gestaltung Form- und Gießlage Gießsysteme und Speiser Gattierung Schmelzeführung* Legierungszusammensetzung* Schmelzebehandlung* Formstoffe und -verfahren Kernherstellungsverfahren Gießtemperatur/-zeit* Kühlkokillen	Konstruktive Gestaltung Kernlager und -sicherung Kernherstellungsverfahren Formstoffe und -verfahren* Verdichtungsunterschiede* Gießanlage und Gießsystem Anordnung und Größe der Speiser Gießtemperatur und -zeit*	Gattierung Zuschläge Schmelzeführung* Stehzeit* Legierung* Impfen* Pfannen- u. Rinntrocknung Gießtemperatur* Gießsystem Gießleistung Formstoff*	Konstruktive Gestaltung Formhohlraumventilation* Aufheizgeschwindigkeit* Vergasungsgeschwindigkeit* Gasdurchlässigkeit* Gasabgabe* Verdichtungsunterschiede* Trocknungsunterschiede* Aushärtungsunterschiede* Formstofftrennmittel Formstoffüberzüge*

*größere Schwankungen möglich

Das Bestreben, Wasserstoff aufzunehmen, gehört zu den physikalischen Grundeigenschaften von Aluminium und seinen Legierungen. Die Gasporosität entsteht durch die Senkung der Löslichkeit von Gasen (hauptsächlich H_2 , aber auch N_2 , CO , und CO_2) während der Erstarrung der Schmelze, Bild 19.

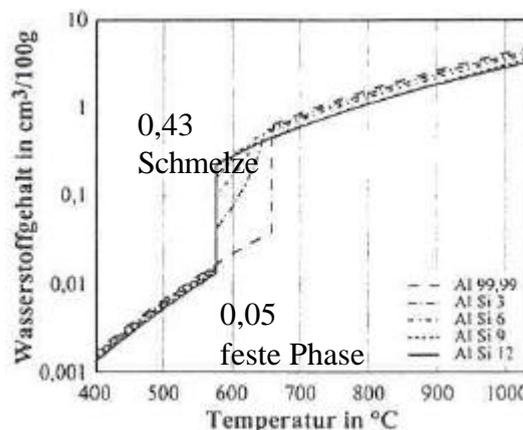


Bild 19 Abhängigkeit der Wasserstofflöslichkeit von der Temperatur für verschiedene AlSi-Legierungen bei einem Wasserstoffdruck von 1 bar [51]

Bei der Porenbildung im Aluminiumgussstück handelt es sich in erster Linie um Wasserstoffausscheidungen [52,53]. Im festen Metall sind nur ca. 10% des Wasserstoffs gelöst. Die restlichen 90% liegen im ungelösten Zustand im Metall vor. Die Legierungselemente Cu, Si, Mn und Ni senken die Löslichkeit von Wasserstoff, die Elemente Ti, Cr und Fe hingegen erhöhen dessen Löslichkeit. Durch Zugabe von Ca oder Sr in die Schmelze wird ebenfalls die Löslichkeit von Wasserstoff erhöht. Wasserstoffaufnahme in die Schmelze erfolgt aus der

Luft durch Luftfeuchtigkeit und bei Kontakt mit feuchten Werkzeugen oder Sandkernen bzw. schlecht ausgetrockneter Ofenauskleidung. In [54] wird die Wirkung des Umfüllprozesses auf den Wasserstoffgehalt quantifiziert, Bild 20.

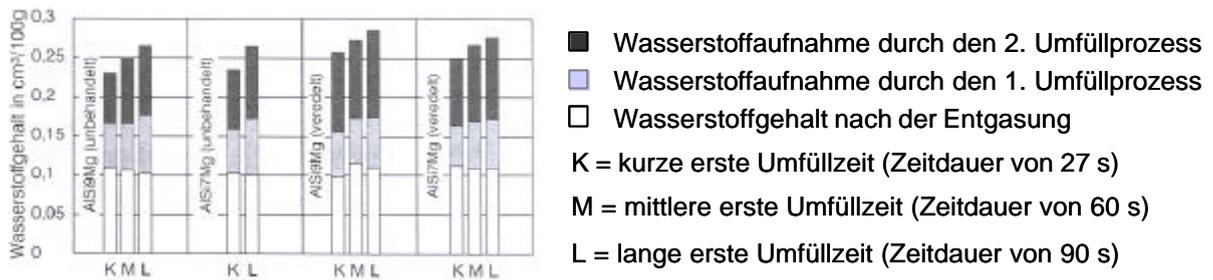
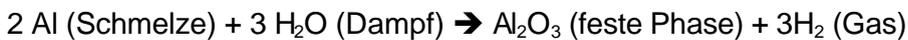


Bild 20 Änderung der Wasserstoffgehalte durch die Umfüllprozesse für unbehandelte und veredelte Schmelzen der Legierungen AlSi7Mg und AlSi9Mg [54]

Die Zerlegung des Wasserdampfes erfolgt nach der Gleichung:



Diese Reaktion verläuft sehr schnell und schon bei sehr kleinen Mengen von Wasserdampf entsteht eine große Menge Wasserstoff (18g Wasserdampf \cong 22,4 l H₂ + 32g Al₂O₃).

In der Literatur [55,56] sind zum Zweck der Qualitätsorientierung Wasserstoffgehaltbereiche eingeteilt:

- hoher Gasgehalt (> 1,1%),
- Oberbereich des mittleren Gasgehalts (0,7 ÷ 1,1%),
- Unterbereich des mittleren Gasgehalts (0,3 ÷ 0,7%),
- niedriger Gasgehalt (< 0,3%).

Bei wasserstoffarmen Schmelzen (0,13 ÷ 0,22%) liegt die Porosität im Gussstück unterhalb von 0,8% und ist fast unabhängig von den Erstarrungsbedingungen [57]. D. h., eine größere Porosität im realen Gussstück wird bei der Gewährleistung einer guten Schmelzqualität durch andere Ursachen als Dissorption des Wasserstoffes verursacht [56]. Eine gute Schmelzequalität, bezogen auf den Wasserstoffinhalt wird nur durch ausreichend langes und effektiv eingesetztes Impellern gesichert.

Obwohl die Porosität im Wesentlichen vom H₂-Gehalt abhängt, kann sie auch durch andere Einflussgrößen wie die Erstarrungsgeschwindigkeit und die Behandlung mit Kornfeinungsmitteln oder veredelnden Zusätzen beeinflusst werden. [58] konzentriert sich in ihren Untersuchungen auf die Gasporosität. Durch Abschrecken von Proben zu definierten Zeitpunkten des Erstarrungsvorgangs wurde festgestellt, dass oberhalb eines bestimmten Schwellwertes des Wasserstoffgehalts vorhandene Poren eher weiterwachsen als dass neue Poren gebildet werden. Unterhalb des Schwellwertes findet Porenbildung und –wachstum gleichzeitig und unabhängig vom Wasserstoffgehalt statt.

[59] beschreibt ein thermodynamisches Modell der Porenbildung auf der Basis der Differenz der Grenzflächenenergie zwischen Partikel und der flüssigen Schmelze sowie Partikel und erstarrter Schmelze. Weiterhin wird die Auswirkung der Verteilung und des Volumenanteils von Einschlüssen auf das Porositätsverhalten und die Schaffung thermodynamisch ungünstiger Bedingungen für die Porenbildung diskutiert.

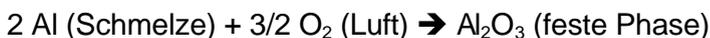
3.2.2 Einschlüsse

Einschlüsse sind Fremdbestandteile im Gefüge. Man unterscheidet **exogene** Einschlüsse, die von außen in die Schmelze gelangen (z. B. Kernsandreste, feuerfeste Stoffe), und **endogene** Einschlüsse, die erst in der Schmelze durch metallurgische Behandlung oder chemische Reaktionen gebildet werden, beispielsweise Oxide [49]. Bestimmte Mengen von Unreinheiten, die in der Struktur des Gussstückes Einschlüsse bilden, sind schon in der zum Gießen vorbereiteten, metallurgisch behandelten Schmelze vorhanden. Beim Impellern der Schmelze werden mit den Behandlungsmitteln auch die Unreinheiten, hauptsächlich Oxide entfernt. Schmelzeviskosität, Oxidgröße und Zeit sind Einflussfaktoren, die den Reinigungsprozess beeinflussen.

Der Anteil wird durch weitere Effekte/Probleme erhöht:

- Oxidation während der Gießbehälterfüllung,
- Oxidation der Schmelze während des Transportes zur Gießform,
- Oxidation während der Formfüllung,
- Verschmutzung des Transportbehälters,
- Verschmutzung von Gießwerkzeugen,
- Verschmutzung des Formhohlraumes (Sandkern, Strahlmittel, Oxid- oder Schmelzreste, Kokillenschichte).

Die wichtigsten Oxidarten, die sich in Aluminiumschmelzen bilden, sind Al_2O_3 und MgAl_2O_4 . Einschlüsse bilden außerdem MgO , SiC , SrO , $\text{Sr}(\text{OH})_2$, TiB_2 . Die freie Reaktionsenthalpie von Aluminiumoxid ist extrem hoch ($\Delta H^\circ_{1020} = -1697 \text{ J Mol}^{-1}$), was starke Oxidation des Aluminiums im schmelzflüssigen Zustand zur Folge hat [60]. Die Reaktion zwischen der Schmelze und der Luft wird folgendermaßen beschrieben:



Die Aluminiumoxidmodifikationen und -eigenschaften sind folgende:

1. das etwa bis 750°C existente $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, verzerrtes Spinellgitter, weich, thermisch instabil, Dichte $3,64$ bis $3,96 \text{ g cm}^{-3}$, spezifische Oberfläche 150 bis $400 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$,
2. das etwa über 750°C entstehende $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, hexagonales Gitter, hart, thermisch stabil, Dichte $3,96$ bis $4,02 \text{ g cm}^{-3}$, spezifische Oberfläche meist um $1 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$.

Die Oxide sind extrem feinporig, was eine große spezifische Oberfläche und Kapillarität mit hoher Diffusionswirksamkeit ergibt. Es entstehen Oxidagglomerate mit unterschiedlicher Dichte. Die **Kinetik der Oxidbildung ist extrem groß** - „blanke“ Schmelzespiegel oxidieren an der Atmosphäre in Bruchteilen von Millisekunden. Die zunächst molekularen Oxidfilme wachsen nach noch nicht eindeutig geklärten Wachstumsgesetzen, die unter anderem legierungsabhängig sind.

Die Art der Ausbildung des Aluminiumoxids hängt im Wesentlichen von seinem Alter ab, d. h. zu welchem Zeitpunkt während des Gieß- und Formfüllprozess es entstanden ist. Turbulenzen während der Formfüllung verursachen die Bildung von amorphen filmartigen Einschlüssen, die als **junge Oxide** bezeichnet werden [61]. Die Einschlüsse sind zusammenhängend, haben eine geringe Dicke und sind häufig gefaltet oder schrumpelig. Sie entstehen, wenn das Anschnittsystem ungünstig ausgelegt ist und mit einer Oxidhaut überzogene Metallströme aufeinandertreffen.

Turbulenzen beim Handling der Schmelze, z. B. durch Umgießen oder im Halteofen verursachen die Bildung von kristallinen $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ -Häuten, die als **alte Häute** bezeichnet werden. Sie sind deutlich dicker als die jungen Häute, weisen zahlreiche Falten auf und enthalten Luft-einschlüsse. Nach einer längeren Verweilzeit wandelt sich das $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ zu $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ um (über 750°C), das dann die sog. **harten Einschlüsse** bildet. Diese allotrope Umwandlung findet in der Regel beim Anhaften und Ansammeln von $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ -Häuten an den Tiegelwänden statt. Diese harten Einschlüsse sind größer als die Tonerdehäute, sie haben eine schwarze Farbe und eine hohe Härte [61].

Im flüssigen Aluminium treten Wasserstoff und Sauerstoff (als Oxid Al_2O_3 oder Mischoxid) stets gemeinsam auf und sind miteinander durch Wechselwirkungen verbunden. Die Art der Bindung des Wasserstoffes an das Al_2O_3 durch Adsorption, Chemiesorption, OH-Gruppen u. a. ist gegenwärtig noch weitgehend unbekannt. In [62] wurde bestätigt, dass mit steigendem Verschmutzungsgrad der Schmelze die Zahl der Poren steigt und ihre Form eine rundere Gestalt annimmt. Eine steigende Zahl von Poren stört die Homogenität der Struktur. Die Forderung an die Schmelze den „**Verschmutzungsgrad der Schmelze zu senken**“ oder die „**Oxidation zu verhindern**“ resultiert aus:

1. der Gesetzmäßigkeit, dass Wasserstoff sich an die Oxide anlagert und diese auch als Keime das molekulare Ausscheiden des gelösten Wasserstoffes begünstigen [56],
2. dem Zusammenhang, dass oxidarme Legierungen auch einen niedrigen Wasserstoffinhalt aufweisen, der auch verhältnismäßig einfach herabgesetzt werden kann. Einschlussreiche Legierungen sind hingegen nur sehr aufwendig entgasbar.

Die Festigkeit der Oxidhaut auf Aluminiumschmelzen ist nach der Drehmomentmethode messbar [63]. Eine hohe Oxidhautfestigkeit und damit eine dichte und undurchlässige Struktur weisen nur Oxidhäute auf Reinaluminiumschmelzen auf. Bei allen Legierungsschmelzen bilden sich dagegen Mischoxide, die die Oxidhäute mehr oder weniger durchlässig machen und ihre Festigkeit stark herabsetzen. So ist z. B. die Schicht der Calciumoxide sehr porös. Höhere Überhitzungstemperaturen, die Haltezeit auf dieser Temperatur und Veredelung (hauptsächlich mit oberflächenaktiven Mitteln) können die Festigkeit der Oberflächenhaut wesentlich senken. Damit muss die Auffassung, dass die Oxidhaut die Schmelze vor der Atmosphäre und damit vor Oxidation bzw. Wasserstoffaufnahme schützt, weitgehend **revidiert werden**.

Die Einteilung der Größe und Gestalt von Oxidpartikeln oder Teilchen anderer nichtmetallischer Verunreinigungen in Reinaluminium zeigt [63].

3.3 Wirkung und Auswertung der Inhomogenitäten in der Struktur

Die Porosität hat eine negative Wirkung auf die mechanischen Eigenschaften von gegossenen Bauteilen. In der Fachliteratur diskutieren die Wissenschaftler und Techniker die Entstehungsmechanismen von Porosität, die Ursachen der Porenbildung, ihre Auswertung und Wirkung auf die statischen und dynamischen Eigenschaften. Im Kap. 3.2 und im folgenden wird auf den **engen Zusammenhang zwischen Porosität und Oxidation** eingegangen.

3.3.1 Wirkung der Inhomogenitäten

Die Kenntnis der Morphologie von Gussfehlern, ihr metallurgischer Ursprung und ihre strukturellen Äußerungen, ermöglicht es durch geeignete technologische Maßnahmen, ihre Entstehung zu verhindern oder zu erschweren.

In vielen Arbeiten wird die Beziehung zwischen Zugfestigkeit und Porosität diskutiert. Eine Formel für die Abhängigkeit der Festigkeit vom DAS und der Porosität haben auch [64,65] abgeleitet. Danach werden die Zugfestigkeit und die Streckgrenze durch steigende Porosität nur wenig verschlechtert, während die Bruchdehnung deutlich abfällt. Die kritische Grenze soll bei Porositätsgraden von 1% liegen. Da aber ein Porositätsanteil um 1% schwer bestimmbar ist, sind die so erhaltenen Aussagen **nur bedingt** verallgemeinerungsfähig. Stroppe [66] beschäftigt sich mit der Wirkung von Porosität auf die statischen mechanischen Eigenschaften der Al-Legierung und knüpft praktisch an die Arbeit von Schindelbacher [67] an. Schindelbacher hat den Porenmorphologieparameter und den Rundheitsfaktor definiert und die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Porosität experimentell für Druckgussteile und die damit verbundene Makroporosität abgeleitet. Stroppe hat ein mathematisches Modell entwickelt, in dem er den Qualitätsindex als das charakterisierende Kriterium für mechanische Eigenschaften einsetzt. Neben der Porosität bezieht Stroppe auch den DAS als Gefügeparameter in die Betrachtung des Qualitätsindex ein [68]. Für die Legierung AlSi7Mg0,3 fand der Autor eine Übereinstimmung der rechnerischen und experimentell bestimmten Qualitätskennwerte.

[69] schreibt, dass große Poren und eine unveredelte Schmelze sich als besonders ungünstig erweisen. Ein niedriger Porositätsgrad, ein kleiner DAS, und ein hoher Veredelungsgrad sind erforderlich für höchste Temperaturwechselbeständigkeit. Der Einfluss des Porositätsanteils und der Porengröße auf die Temperaturwechselbeständigkeit geht aus dem Bild 21 hervor. Poren haben in Abhängigkeit von ihrer Form, der Lage zur Gussoberfläche und der Anordnung zueinander unterschiedliche Kerbwirkungen. Die Kerbwirkung nimmt

- mit dem Flächenanteil der Porosität und mit dem Porendurchmesser zu und
- mit zunehmender Rundheit und wachsendem Abstand der Poren von der Gussoberfläche ab.

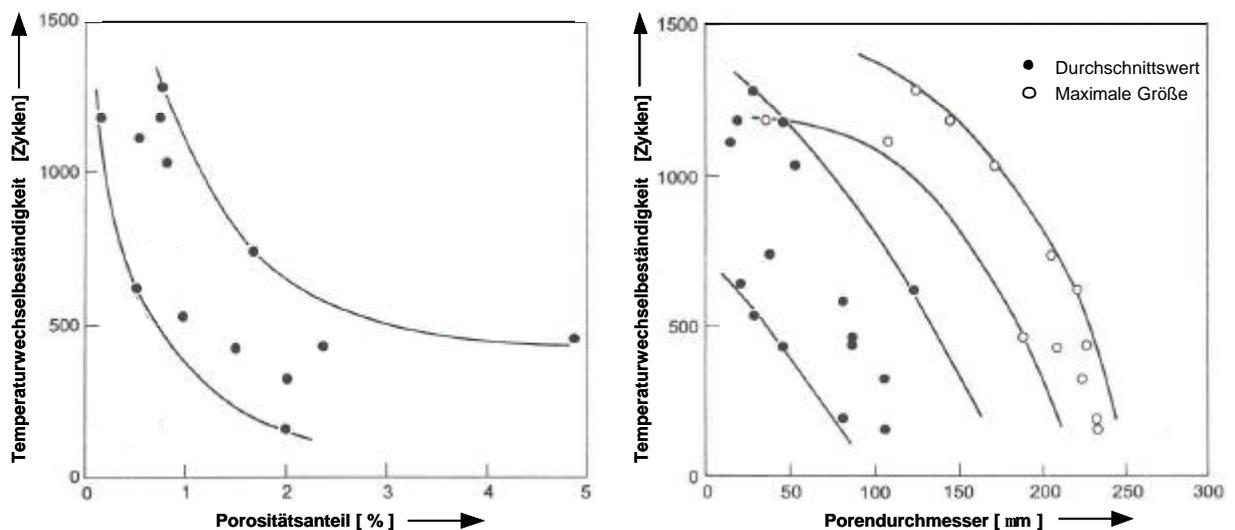


Bild 21 Zusammenhang zwischen dem Porositätsanteil, der Porengröße und der Temperaturwechselbeständigkeit bei AlSi6Cu4 [69]

Bei thermisch und dynamisch hoch beanspruchten Bauteilbereichen in Zylinderköpfen können schon geringe Anteile Mikroporosität und Einschlüsse das Bauteilverhalten, insbesondere bei höheren Temperaturen, negativ beeinflussen. Nach Ansicht der Autoren in [70] ist aufgrund der komplexen Zusammenhänge und des aufwendigen Porennachweises eine Vorhersage der dynamischen Lebensdauer als problematisch anzusehen.

Die Geometrie des Bauteils, Inhomogenität durch Oxidhäute, Einschlüsse, Gefügebestandteile, intermetallische Verbindungen etc. und andere Gussfehler können Kerben verursachen, deren Kerbwirkung größer als die von Poren sein können. Die Mikroporosität in einem Al-Gussteil kann einen erheblichen Einfluss auf die Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen ausüben. Die Ergebnisse von Untersuchungen zu diesem Thema sind in [71] veröffentlicht. In [70] wurde festgestellt, dass die dynamischen Eigenschaften von Gusswerkstoffen vielmehr durch den Anteil, die Verteilung und die Größe von Poren beeinflusst werden als durch die Wärmebehandlung. [72] beschäftigt sich mit der Wirkung des Formfüllvorganges auf die Schwingfestigkeit von Al-Gussstücken. Es wurde festgestellt, dass „ruhig gefüllte“ Probegussteile eine bis zu sechsmal höhere Schwingfestigkeit als die „turbulent gefüllten“ aufweisen (bei einer extrapolierten Versagenswahrscheinlichkeit von 0,1%). Die Bruchflächen der turbulent gefüllten Proben wiesen auffällig hohe Anteile junger Oxide auf, häufig in Verbindung mit Gasporosität. Im Laufe der Zeit kleben mehrere solcher Oxidfilme zusammen und werden kompakter, was dann Auslöser für Ermüdungsrisse sein können. In [73, 74] wurde ebenfalls festgestellt, dass die Oxide auf die Rissentstehung und den Bruch einen größeren Einfluss als die Gasporosität ausüben. In diesem Zusammenhang wurde die These aufgestellt, dass vor allem **Oxidhäute den lebensdauerbestimmenden Faktor bei schwingender Beanspruchung darstellen**. D. h. die gute metallurgische Qualität und beherrschte Formfüllung, die die Homogenität günstig beeinflussen, sind sehr bedeutende Einflussfaktoren für die Gussstückeigenschaften. Aus den Beiträgen ist abzuleiten, dass der Einfluss des Gießsystems, der direkt auf die Entstehung von Oxiden wirkt, eine höhere Priorität als die Speisung besitzt.

[38] widmet sich der Festlegung von dynamischen Werkstoffeigenschaften für die thermisch hoch belasteten Zylinderköpfe. Dabei ist es sehr schwierig Messmethoden zu definieren, die in idealem Falle die genaue Simulation der Zylinderkopfbelastung durch Laboreinrichtungen realisiert. Am ehesten erreicht man eine Annäherung durch zyklische mechanische Belastung bei erhöhter Temperatur bis zur 350°C und dasselbe mit eventuellen gleichzeitigen Temperaturänderungen. Aus [38] geht hervor, dass die gewonnenen Werte vom Bereich der Probenentnahme aus dem Gussstück und der Orientierung der Makrostruktur, bezogen auf die mögliche Anisotropie von Eigenschaften, abhängig sind. Interessante Informationen über den Mechanismus der Werkstoffzerstörung von Zylinderköpfen können mit dem Einsatz von Methoden der linearen Bruchmechanik oder elastisch-plastischen Bruchmechanik gewonnen werden.

Die Porosität beeinflusst nicht nur die mechanischen Eigenschaften, sondern auch die Oberfläche der Gussteile. Die Einschlüsse wirken sich negativ auf die Bearbeitbarkeit des Teiles und auf den Korrosionswiderstand aus. Sehr negativ wirkt die Gasporosität auf die Schweißbarkeit. Die Einschlüsse können die Dichte und die Viskosität der Schmelze erhöhen und bewirken eine Verringerung des Fließvermögens[75]. Daraus kann eine schlechtere Gießbarkeit resultieren.

3.3.2 Auswertung der Inhomogenitäten

Die Bestimmung und Bewertung der Porosität in gegossenen Teilen ist, wie bereits [76] beschreibt, durch den Fakt charakterisiert, dass eine Normung fehlt. Bei der Bestimmung und Bewertung der Porosität handelt es sich immer um interne Methoden von einzelnen Forschungsinstituten, Metall-Produzenten, Gussstückzulieferer oder –abnehmer. So definiert ein namhafter Automobilkonzern nur Poren größer 0,4 mm als Ausschusshohlräume und legt in seinen konzerninternen Normen Porenklassen fest, die sich ausschließlich auf regelmäßig verteilte Poren bezieht. Dies entspricht jedoch nicht den praktischen Gegebenheiten. [77] haben in ihrer Arbeit ein klassisches Problem bei der Auswertung von Volumendefekten (Poren) durch metallographische Methoden aufgezeigt. Bewertet wird eine zweidimensionale Betrachtungsebene, die einen mehr oder weniger zufälligen Schnitt durch die Pore darstellt. Die dreidimensionale Ausdehnung der Pore wird vernachlässigt.

Die Situation der Porenbeschreibung, wie sie dargestellt wurde, hat sich im Mai 2002 mit der Ausgabe des VDG-Merkblattes „Volumendefizite von Gussstücken aus Nichteisenmetallen“ verändert [78]. In dem Merkblatt ist z. B. die Grenze für Mikro-/Makroporosität mit 0,5 mm definiert und die Beschreibung der Porosität allgemeingültig festgelegt. Die Beschreibung beinhaltet Informationen über die Beanspruchungsart, die max. zulässige Porosität oder die max. Anzahl von definierten Poren auf der Bezugsfläche bei Bauteilen mit besonderen Anforderungen an Funktionsflächen, die max. zulässige Einzelporengröße (nach Absprache definiert) und individuell zu vereinbarende Zusatzinformationen. Diese Porenklassifizierung wurde von [79] übernommen.

An Poren und Einschlüsse interessiert:

- Größe,
- Form,
- Anzahl,
- Verteilung und
- Lage zur Gussoberfläche.

Zur Bestimmung der Porosität eignen sich zerstörungsfreie und zerstörende Methoden (mit und ohne Quantifizierungsmöglichkeit). Zu den zerstörungsfreien zählen:

- Röntgenprüfung,
- Computertomographie,
- Ultraschallprüfung,
- Wirbelstromprüfung,
- Dichtepfung,
- Dichtheitsprüfung,
- Sichtprüfung.

Zu den zerstörenden zählen:

- Schliff- und Schnittprüfung
 - Licht- und Rasterelektronenmikroskopie,
 - digitale Bildanalyseverfahren,
 - stereologische Verfahren.
- Dichtepfung,
- Bruchprüfung.

Bei einigen Methoden handelt es sich nicht nur um die Feststellung der Porosität, sondern auch allgemein um Inhomogenitäten.

Die ermittelten Daten sind:

- | | |
|-----------------------------|---|
| <i>analysiertes Volumen</i> | - Porositätswert, |
| | - gesamte Oberfläche der Mikroporen pro Volumenanteil, |
| <i>analyzierte Fläche</i> | - Porositätswert, |
| | - Anzahl von Poren, |
| | - Minimum-, Maximum- und Mittelwert, |
| | - Porenmorphologieparameter, |
| | - Abstände zum ersten, zweiten und dritten Nachbarn, |
| <i>für einzelne Poren</i> | - mittlere Krümmung der Poren im dreidimensionalen Gefüge, |
| | - Rundheitsfaktor im zweidimensionalen Gefüge (automatische Analyse). |

Wendt u.a. [80] beschreiben das Prinzip und die Anwendung des zerstörungsfreien Prüfverfahrens – Computertomographie. Es handelt sich um eine Kombination der Röntgenprüfung und der Schnittprüfung. Diese Methode wurde anhand eines realen Druckgussteils der Röntgen-, Schnitt- und Schliffprüfung gegenübergestellt. Die Methode ist universell einsetzbar und soll sich hervorragend als ein Verfahren zur Porositätsprüfung eignen. Auf Grund eigener Erfahrungen muss für eine sichere Bewertung der Mikroporosität die Technologie der CT verfeinert werden. In Kombination z.B. mit einer automatischen Bildverarbeitung der Schnittfläche kann diese Methode in Zukunft ein effizientes Werkzeug werden.

Lukac und Michna [81] beschäftigen sich mit der Auswertung der Struktur von gegossenen AlSi-Legierungen. Die Autoren stellen in ihrer Arbeit anomale Strukturen mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie, schwarzweißer und farbiger Lichtmikroskopie dar. Bild 22a zeigt eine Bruchfläche, die einen Bereich mit dekohesiven Zerrüttungen zeigt, die typisch für die Anwesenheit von Oxidhäute sind. Eine allgemeine Bewertung von Bruchoberflächen kann visuell mit einer Vergrößerung von 50x erfolgen; Details sind bei einer Vergrößerung von 200x gut erkennbar.

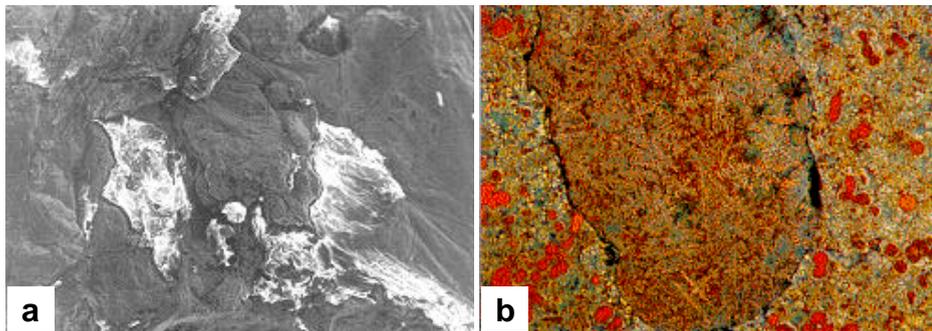


Bild 22

REM-Aufnahmen vom Gefüge

a) Bruchoberflächenstruktur in der Nähe eines Defektes, Vergrößerung 36x

b) Struktur einer heterogenen Erstarrung des Silumin innerhalb und außerhalb der Oxidhaut, Vergrößerung 150x [81]

Die farbige Lichtmikroskopie hilft hauptsächlich in Kombination mit der EDX-Analyse bei der Identifizierung von einzelnen Strukturbestandteilen (Einschlüsse, intermetallische Phasen).

Die Kombination ermöglicht heterogenen Kristallisationsverlauf und Inhomogenitäten der chemischen Zusammensetzung (z. B. chemische Seigerung in Dendriten der α -Phase) festzustellen. Gerade die Anwesenheit von Oxidhäuten in der Struktur kann den heterogenen Kristallisationsverlauf und Differenzen der chemischen Zusammensetzung verursachen, Bild 22b.

Wie bereits im Kap. 3.1 – 3.2 ausgeführt, sind ungenügendes Impellern, unpräzises Abkrätzen der Oxidhaut und die schlechte Beherrschung der Formfüllung von großer Bedeutung auf die Qualität des Gussstückes, insbesondere auf seine Homogenität (Bild 23).

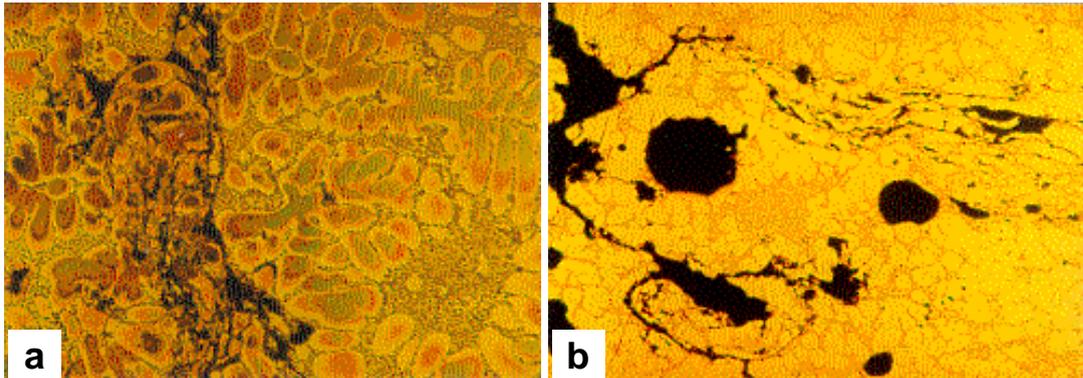


Bild 23 Struktur von AlSi7Mg0,3 mit großem Anteil an Oxidhäuten (a) und großen Poren (b), Vergrößerung 150x [81]

Die Mikrolunker können ebenfalls auf Bruchflächen festgestellt werden. Ihre Existenz äußert sich durch freigelegte Dendriten der α -Phase, Bild 24a. Die Lunker haben im Vergleich zu Gas- und Luftporen eine unregelmäßigere, kompliziertere Form, Bild 24b. Sehr oft sind aber **kombinierte Fehler**, welche die Merkmale sowohl von Lunkern wie von „Blasen“ aufweisen, vorhanden (Bild 24c). Das erschwert die Festlegung von technologischen Maßnahmen zur Verbesserung der Qualität von gegossenen Teilen. In [82] ist eine Vermutung formuliert, dass der primäre Fehler Gasporosität ist. Während der Erstarrung wird das Volumendefizit bevorzugt durch die Vergrößerung von diesen Poren ausgeglichen und die Dendriten bilden die Porenoberfläche.

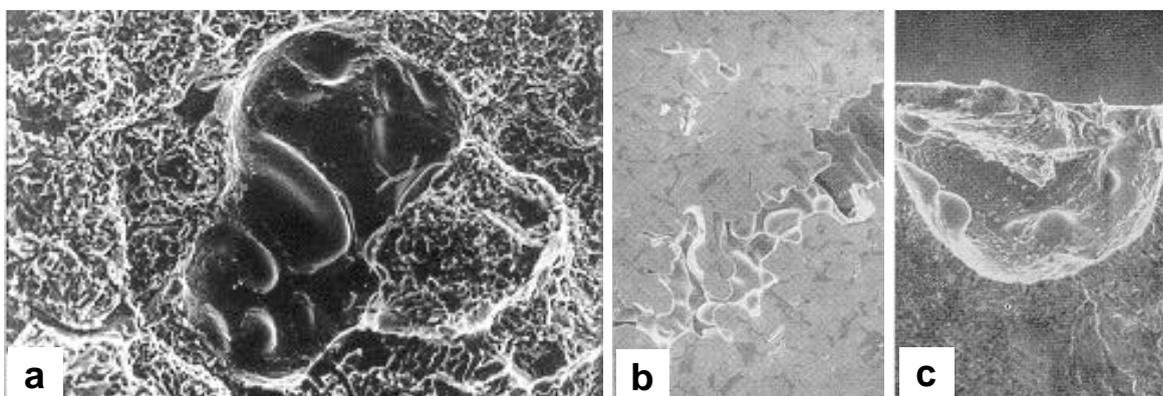


Bild 24 Gussfehler beobachtet mit REM [82]
 a) Bruchoberfläche bei Anwesenheit von freigelegten Dendriten der α -Phase / Vergrößerung 200x
 b) Lunker / Vergrößerung 100x
 c) Kombiniertes Fehler / Vergrößerung 170x

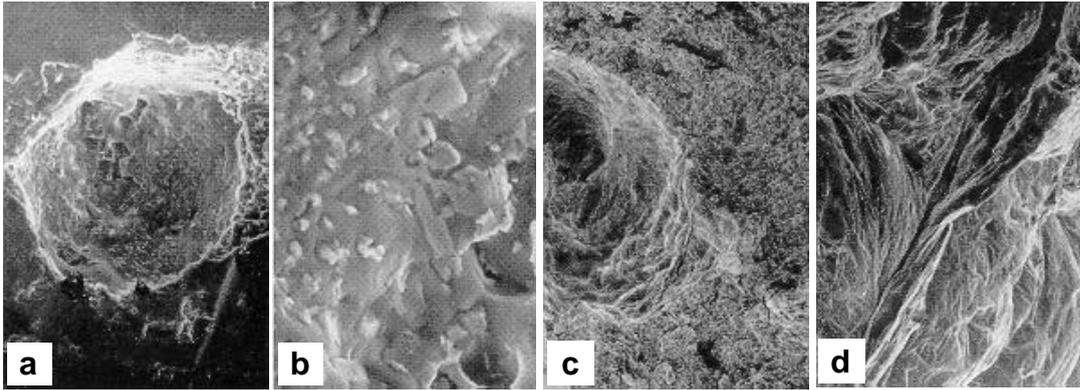


Bild 25 Gussfehler beobachtet mit REM [82]

- a) endogene Gaspore / Vergrößerung 170x
- b) Detail vom Porenboden mit dem Skelettgebilde von intermetallischen Phasen und Si-Kristallen/hell / Vergrößerung 700x
- c) exogene Gaspore / Vergrößerung 17x
- d) Detail der mit Oxiden belegten Wand einer Gaspore / Vergrößerung 170x

Typisch ist für endogenen Gasporen die Kugelform und die metallisch blanke innere Oberfläche mit gut identifizierbaren Strukturbestandteilen, Bild 25a,b. Die exogenen Poren sind größer, ihre Form ist selten kugelig und charakteristisch ist die oxidierte Innenfläche, Bild 25c,d.

In [83] wurde die quantitative Gefügeanalyse (digitale Bildanalyseverfahren in Kombination mit stereologischen Verfahren) der Mikroporosität in AlSi7Mg an Kokillen- und Sandgussplatten beschrieben. Es wurde festgestellt, dass die Erstarrungsgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Lokalisierung der Mikroporen und die Dichte des Gussteils hat.

Hoch interessant wäre es bestimmt, innere Hohlräume und Feststoffeinschlüsse mittels zerstörungsfreier Verfahren zu unterscheiden. Durch [84] ist eine Methode entwickelt worden, die mit Ultraschallechos arbeitet und an einfachen Modellen ausprobiert wurde. Genauso interessant ist die Methode zur Unterscheidung von Gas- und Lunkerporen. So haben die Autoren in [85] eine Methode entwickelt, die für hohe Porositäten bei Druckgussteilen gesicherte Aussagen liefert. Einer ähnlichen Aufgabenstellung ist der Beitrag in [86] gewidmet, welcher die Dichtepfung durch das Vakuumerschmelzverfahren ersetzt.

Der Einfluss des Anschnitt- und Speisungssystems auf die Homogenität des Gussteils beim Schwerkraftguss von Al-Legierungen ist bezogen auf reale Bauteile nur ungenügend untersucht [87].

3.3.2.1 Computerunterstützte Bildverarbeitung

Den Ablauf der Arbeiten bei der metallographischen Untersuchung und Bewertung zeigt Bild 26. Es handelt sich um eine zerstörende Prüfung, bei der aus dem gegossenen Teil Proben präpariert und metallographisch vorbereitet werden. Die Auswertung der Schiffe am Computer wurde im Rahmen dieser Untersuchungen mit Hilfe der Software analySIS 3.0 der Fa. Soft Imaging System GmbH durchgeprüft.

Bei der Auswertung werden praktisch dunkle Objekte auf hellem Hintergrund analysiert. Damit kann man nicht zwischen der Art von Defekten Poren/Lunker unterscheiden. Die Proben müssen sehr sauber poliert und im staubarmen Milieu analysiert werden. Staubpartikel auf

der Oberfläche und Korrosion können das Ergebnis verfälschen. Bei bestimmter Einstellung des Schwellwertes zur Auswertung der Mikroporosität und feinen Einschlüssen können korrodierte Phasen ebenfalls als Defekte erkannt werden.

Um die subjektiven Fehler, die durch die auswertenden Mitarbeiter entstehen, möglichst gering zu halten, wird empfohlen die Auswertung einer Versuchsreihe bzw. zusammenhängende Versuchsreihen nur von einer Person durchführen zu lassen. Geräteeinstellungen und Softwareeinstellungen sind konstant zu halten.

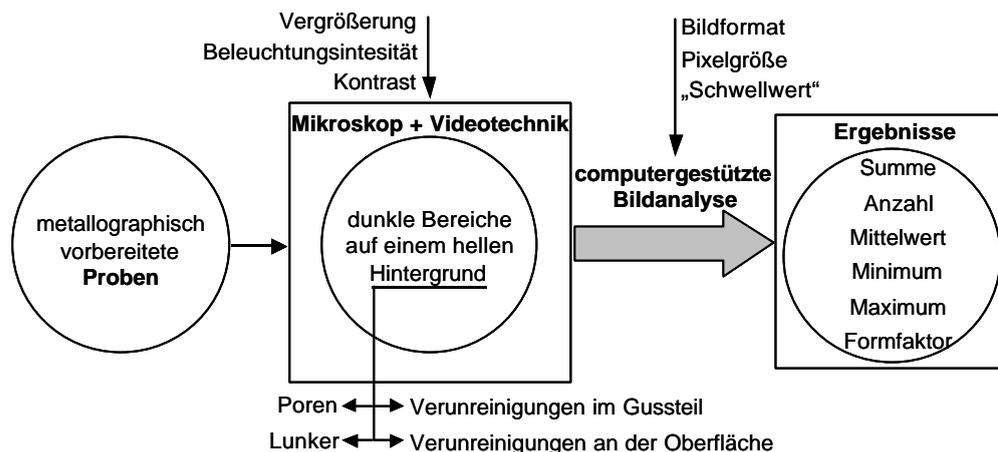


Bild 26 Ablauf der metallographischen Probenauswertung unter Verwendung eines computergestützten Bildverarbeitungssystems

Die Auswertung mittels Bildverarbeitung ergibt folgende Kennwerte:

- Porenfläche: gesamte Fläche der identifizierten dunklen Bereiche (im weiteren „Summe“ genannt),
- Mittelwert: statistisch bestimmte durchschnittliche Poren-Größe,
- kleinste messbare Poren-Abmessung:
wird durch die minimale Auflösung (Empfindlichkeit) der Kamera bestimmt (im weiteren „Minimum“ genannt),
- maximale Poren-Größe (im weiteren „Maximum“ genannt),
- Anzahl der Poren im betrachteten Oberflächenbereich,
- Formfaktor: definiert das Verhältnis zwischen dem Umfang und der Fläche.
Er ist immer ≤ 1 und beschreibt die Abweichung von der Kreisform; letztere entspricht dem Formfaktor 1.

Anhand dieser Kennwerte ergibt sich der Porositätswert (Porositätsgrad) wie folgt:

$$\text{Porositätswert} = \frac{\text{Summe}}{\text{analysierte Fläche (Bildformat)}} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (2)$$

Ein wichtiger Parameter ist der untersuchte Oberflächenausschnitt. Er hängt von der eingestellten Vergrößerung am Mikroskop ab. In dem VDG-Merkblatt [78] wird empfohlen, metallographische Schliffe mit der Vergrößerung von 25:1 oder auch 20:1 zu betrachten. Folgende Empfehlung ist formuliert: „Das Messfeld muss so klein gewählt werden, um den relevanten Bereich zu erfassen, aber gleichzeitig so groß wie möglich, damit sich die Porenverteilung herausmittelt.“ Das alleine sichert noch keine zuverlässige Aussage über die Porosität, Bild 27. Beispiel 4 im Bild 27 ist aus [78] entlehnt. Das rote (gestrichelte) Quadrat wurde einge-

zeichnet. Die Porosität in einem solchen Quadrat ist nicht größer als die Porosität des kleinen Quadrats auf dem Bild rechts unten. Die Wirkung der gewählten Vergrößerung wird durch die drei schwarzen Quadrate in der Bildmitte dargestellt. Auch an diesem Beispiel ist die Notwendigkeit der optimal gewählten Vergrößerung zusammen mit einer Reihe von Messungen pro untersuchtem Bereich deutlich erkennbar.

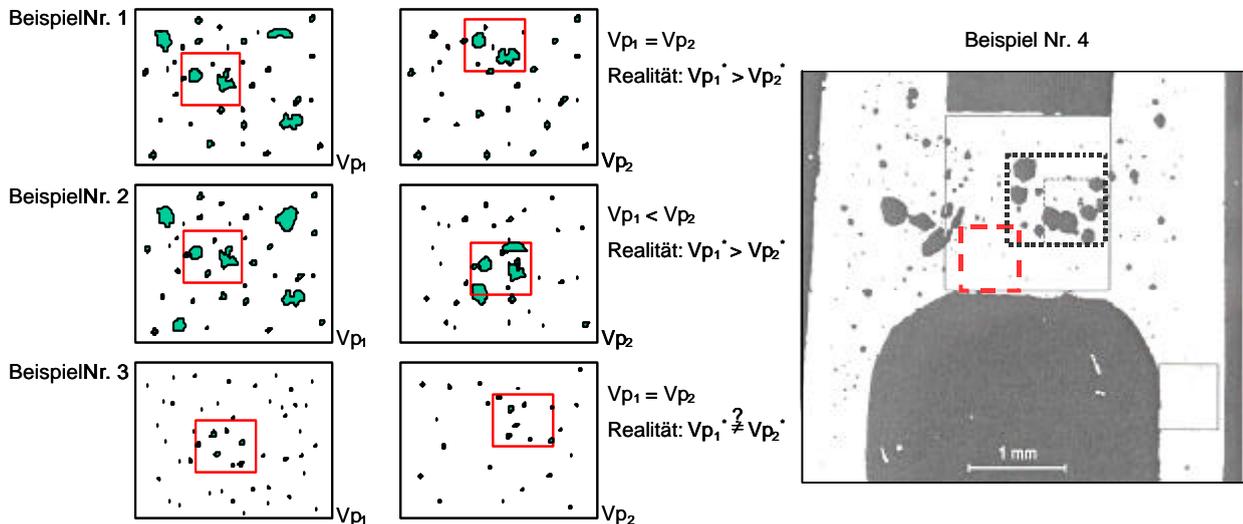


Bild 27 Bezugsflächen für die Porositätsbestimmung

Mit dem Schwellwert ist die „Sensibilität“ der Analyse einstellbar. Mit einem höheren Schwellwert werden mehr Objekte identifiziert. Die Gesamtfläche (Summe) ist bei hohem Schwellwert jedoch fehlerbehaftet, da die Gestalt der Poren (speziell der Lunker) stark gerundet wird. Daraus ergeben sich zusätzlich Abweichungen bei den Werten für den Formfaktor. Die Einstellung geringerer Schwellwerte kann auch eine Teilung der Fläche einer Pore in zwei Poren bewirken.

Daher muss bei der Parameterwahl und der Auswertung:

- die Anzahl von Objekten,
- die Summe der Fläche von Objekten und
- die Form von Objekten

berücksichtigt und eine optimale Variante gefunden werden.

Es muss festgestellt werden, dass die Bestimmung der „Porosität“ mittels eines Bildverarbeitungssystems stark subjektiv beeinflusst wird. Ohne das Vorhandensein eines Vergleichsstandards sind objektive Messungen der Werte nicht möglich. Für Vergleichsmessungen ist die Methode jedoch durchaus geeignet.

3.3.2.2 Dichteprüfung

Dieses Verfahren ermöglicht nur eine Aussage über die Volumenporosität im gesamten Bauteil/Probe. Da die Dichteprüfung im Allgemeinen nach dem archimedischen Prinzip mit Wasser durchgeführt wird, ist es mit diesem Verfahren nicht möglich, offene Poren zu quantifizieren.

Zur Messung wurden ein Pyknometer und eine Analysenwaage (Bild 28), mit 0,1mg Ablesbarkeit, eingesetzt. Die Dichtemessung mit Pyknometer ist ein Verfahren, bei dem die Ge-

nauigkeit der Versuchsergebnisse und die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit von Werten sehr stark an eine exakte, höchst präzise Laborarbeit gebunden ist.

Folgende Messwerte sind festzustellen:

- Masse Probe,
- Masse Pyknometer (trocken, ohne H₂O),
- Masse Pyknometer (mit H₂O, außen trocken),
- Masse Pyknometer (mit H₂O und Probe, außen trocken).

Die Bestimmung der direkten Messgrößen ist mit Messabweichungen behaftet. Die absolute Abweichung von ρ ergibt sich durch die Fehlerfortpflanzung der Einzelmessgrößen. Es wurde die Reproduzierbarkeit überprüft und die absolute Abweichung $\Delta\rho = 8 \cdot 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ nach der Gleichung (3) berechnet. Die Δr_w und Δr_L wurden vernachlässigt, weil sie vielmal kleiner als Δm , Δm_1 und Δm_2 sind.

$$\Delta r = \left| \frac{\partial r}{\partial m} \right| \Delta m + \left| \frac{\partial r}{\partial m_1} \right| \Delta m_1 + \left| \frac{\partial r}{\partial m_2} \right| \Delta m_2 + \left| \frac{\partial r}{\partial r_w} \right| \Delta r_w + \left| \frac{\partial r}{\partial r_L} \right| \Delta r_L \quad (3)$$

Es ist notwendig bei konstanten Bedingungen zu arbeiten. Damit ist gemeint:

- das Pyknometer soll unter identischen Bedingungen genutzt werden, d. h. Verdrängung des überschüssigen Wassers; keine Luftblasen an der Innenkontur und das gefüllte Pyknometer ist äußerlich trocken,
- das Wasser muss eine konstante Temperatur und eine gleichmäßige Sauberkeit aufweisen, d. h. es handelt sich um destilliertes Wasser, der Kontakt mit den Händen ist wegen des Wärmeüberganges und der nachfolgenden Dichteänderung zu minimieren und jede Messung ist mit neuem Wasser durchzuführen,
- es ist notwendig die Laborbedingungen konstant zu halten (Lufttemperatur),
- die Proben sollen auch während der wiederholten Messungen eine konstante Temperatur besitzen,
- die Proben müssen eine sehr gute Benetzungsfähigkeit der Oberfläche aufweisen um eine Anhaftung von Luftblasen an der Oberfläche zu vermeiden (polierte Oberfläche mit Lösungsmittel geputzt).

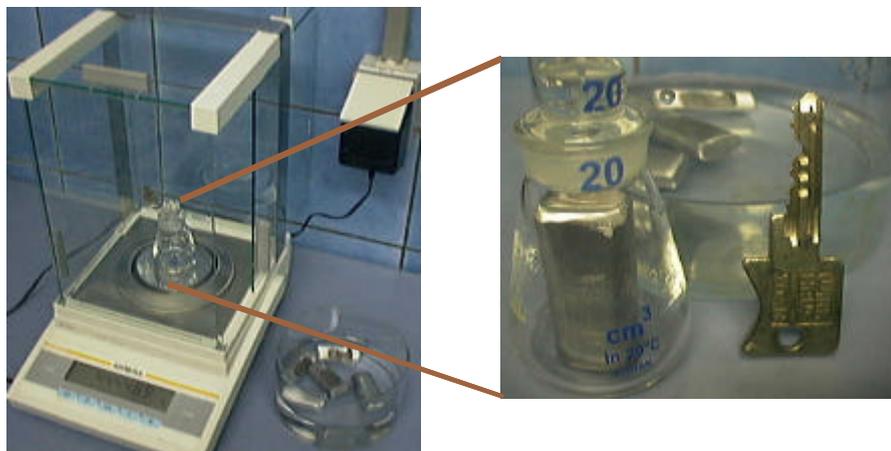


Bild 28 Zur Dichtepfung notwendige Analysenwaage (Typ BP 221S von Sartorius AG) und Pyknometer

Die Dichte der Probe und die Porosität können durch folgende Gleichungen:

$$r = \frac{m \cdot r_W - (m_2 - m_1) \cdot r_L}{m_L - (m_2 - m_1)} \quad (4)$$

$$V_p = \frac{r_{\max} - r}{r_{\max}} \cdot 100\% \quad (5)$$

beschrieben werden.

3.4 Undichte Zylinderköpfe

Ein entscheidender Qualitätsparameter für die Qualitätsbewertung von Zylinderköpfen ist ihre **Dichtheit**. In der Praxis erfolgt eine Prüfung auf Dichtheit durch einen automatischen Druckluft-Lecktest, und zwar

- direkt im Anschluss an die spanende Grobbearbeitung,
- oder erst nach der Wärmebehandlung und anschließender spanender Grobbearbeitung und
- in jedem Fall nach der Fertigbearbeitung vor der Komplettmontage.

Die Bauteile werden unter Wasser mit Druck beaufschlagt und der Druckabfall in einem bestimmten Zeitintervall wird geprüft. Undichte Zylinderköpfe können durch Imprägnieren nachgearbeitet werden. Zum Feststellen der Lage und der Ursache der Undichtheit ist es erforderlich das Bauteil zu zerteilen und so zu zerstören, dass der Werkstoffbruch im Bereich der Undichtheit auftritt, Bild 29.



Bild 29 Bruchfläche im undichten Bereich des Zylinderkopfes

Zuverlässige Aussagen über die Ursache der Fehlerentstehung werden durch die Kombination mit der Auswertung von metallographischen Schliften erreicht. Im Bild 30 sind Beispiele von Oxidhäuten im Werkstoff AlSi7Mg0,3 dargestellt. Die Fehler sind an der Oberfläche auch bei wiederholter Probenpräparierung feststellbar. Bei den metallographischen Untersuchungen trifft man aber sehr selten auf solche kompakten Gussfehler. Defekte solcher Art sind sehr gefährlich, weil von ihnen Ermüdungsrisse initiiert werden können.

Im Bild 31a ist eine der möglichen Ursachen für das Auftreten von Undichtheiten dokumentiert. Die Bilder 29 und 31b zeigen eine glatte Bruchfläche, die durch eine Oxidhaut gebildet wird. Die Oxidhaut verbindet auf dem Bild 29 den Einlasskanalraum mit dem Wasserraumkühlbereich und auf dem Bild 31 den Wasserraumkühlbereich mit dem Ölraumbereich unterhalb des Nockenwellenbereiches. Es handelt sich um eine nicht aufgeschmolzene und nicht

zerrissene Oxidhaut einer nicht kontinuierlich verlaufenden Füllungsfront. In den Kapiteln 7 (Bild 65) und 9 (Bild 103) wird der Entstehungsmechanismus erläutert.

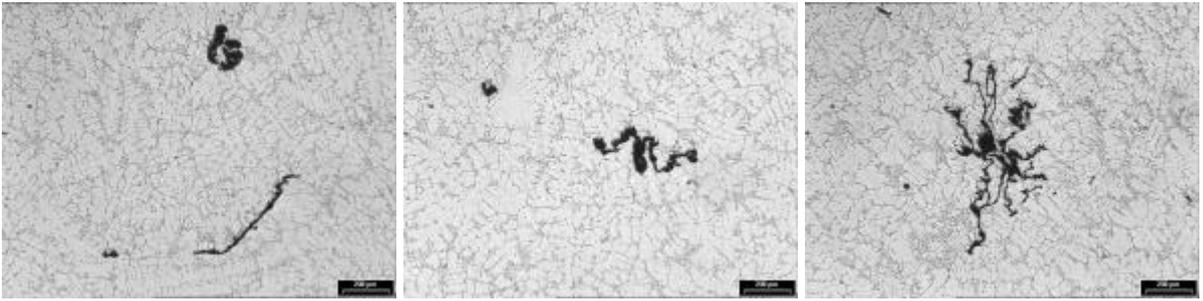


Bild 30 Beispiele von kompakten Oxidhäuten in der Struktur des Werkstoffes Al-Si10Mg (Vergrößerung 50x)

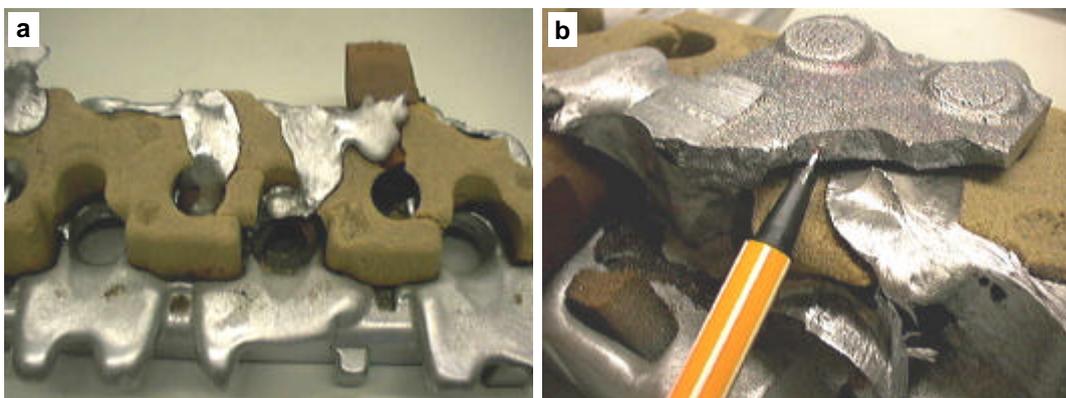


Bild 31 Unterbrochener Abguss und Beispiel eines Defektes

Das größte Risiko entsteht, wenn große Einschlüsse ungünstig in dünnen Wänden positioniert sind, (Wandstärke 2,5mm im Bild 32e). Die Bruchflächenoberfläche unterscheidet sich bereits bei Betrachtung mit dem bloßen Auge deutlich von den vorherigen Beispielen. Es handelt sich um eine transportierte Oxidhaut, sog. „junge Oxidhaut“, in Verbindung mit Porosität. Das letzte Photo im Bild 32 zeigt, dass in Verbindung mit Oxidhäuten Risse verursacht werden können.

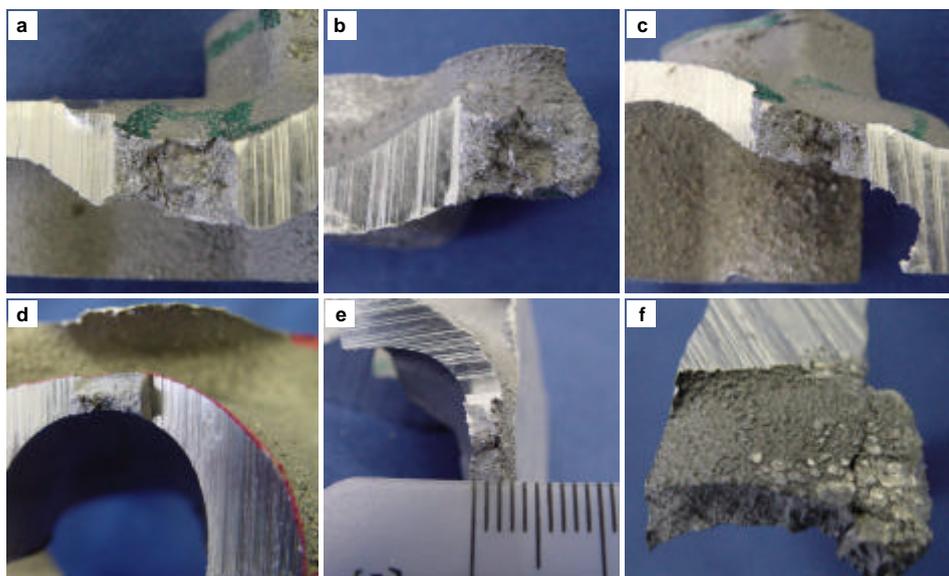


Bild 32 Oxidhaut als Ursache eines undichten Zylinderkopfes

3.5 Ableitung von Schlussfolgerungen zu Qualitätsfragen

Die Schmelz- und Gießtechnologie beeinflusst eine Vielzahl von Qualitätsparametern eines gegossenen Bauteils. Wichtige Kenngrößen, wie z. B. die mechanischen Eigenschaften, sind durch unterschiedliche Gieß- und Erstarrungsbedingungen im Gussstück nicht über den gesamten Querschnitt konstant.

Die mechanischen Eigenschaften im Aluminiumguss werden durch Strukturdefekte negativ beeinflusst, das sind hauptsächlich Oxideinschlüsse, Wasserstoffporosität und Lunkerporosität. Daher ist der Einhaltung optimaler Schmelz- und Gießtechnologieparameter als Voraussetzung für eine Fehlerminimierung größte Aufmerksamkeit zu widmen. Die Oxidhäute haben die stärkste Kerbwirkung und verursachen Undichtheiten in Zylinderköpfen, die durch Imprägnierung nicht immer beseitigt werden können.

Die Wirkung von bestimmten Defekten auf die statischen und dynamischen Eigenschaften wurde in der Fachliteratur umfangreich untersucht und beschrieben. Es gibt zurzeit aber keine exakte quantitative Prüfmethode, die die Inhomogenitäten nach Art, Menge, Verteilung und Form über das Volumen des realen Gussteiles ermittelt. Um die Ausschussquote zu senken, die mechanischen Eigenschaften und die Temperaturwechselbeständigkeit des Gussteiles zu erhöhen, ist es notwendig, nach Wegen zu suchen, die das Vorhandensein von solchen Inhomogenitäten generell senken.

Beide in Kapitel 3.3.2 vorgestellten und in Rahmen diese Arbeit untersuchten und verglichenen Methoden zur Bestimmung der Porosität gestatten es nicht, Absolutwerte für die Porosität zu bestimmen. Die Methode der Dichtemessung eignet sich nicht für die Bewertung der Mikroporosität, da auch bei exakter und sorgfältiger Versuchsdurchführung mit relativ großen Messfehlern gerechnet werden muss. Die Methode der Bestimmung der Porosität an metallographisch präparierten Oberflächen ist nicht genormt und ist zum einen durch die Subjektivität der Auswertung durch den Menschen und zum anderen durch die Auswertung in einer zweidimensionalen Ebene ebenfalls nur für vergleichende Aussagen einsetzbar. Der Begriff „Porosität“ für die durch die Bildverarbeitung ermittelten Defekte ist unkorrekt. Einschlüsse und Porosität sind in dieser Arbeit unter dem Begriff „Inhomogenität“ zusammengefasst. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Methode erarbeitet, bei der zur qualitativen Bewertung von Defekten beide Methoden erfolgreich eingesetzt werden.

4 Gießverfahren zur Herstellung von Zylinderköpfen und ihre Bewertung

Zur Herstellung von Aluminiumzylinderköpfen werden derzeit verschiedene Gießverfahren angewandt. Es ist erstaunlich, wie viele Verfahren für die Herstellung ein und desselben Teiles auf dem Markt zur Verfügung stehen und praktisch genutzt werden. Die Unterschiede sind gekennzeichnet durch das physikalische Prinzip des Metalltransportes, durch den Formwerkstoff und durch die Gießsysteme. Alle diese Verfahren haben ihre Berechtigung - Vorteile und Nachteile. Das Bild 33 gibt eine Übersicht über die Verfahren.

Primär werden die verschiedenen Verfahren, wie im Bild 33 dargestellt, durch die wirkende Kraft auf das Metall beim Gießen unterschieden. Je nach Herstellungsverfahren kann die Form aus bentonitgebundenem Formsand, mittels Kernpaket, mit Lost-foam-Schale oder durch Einsatz von Kokillen gefertigt werden. Die gestrichelte Linie im Schema kennzeichnet die Möglichkeit eine bestimmte Gießtechnologie auch mit einem anderen Formwerkstoff an-

zuwenden. Ähnliche Anschnittvarianten, wie beim Schwerkraftguss in Kokillen, sind auch beim Gießen mit Kernpaket darstellbar.

Theoretisch mögliche Varianten der Gussstückanordnung in der Gießform sind im Bild 34 dargestellt. Die Orientierung des Zylinderkopfes in der Form ist bei einzelnen Gussstückherstellern unterschiedlich gewählt. Befindet sich der Kompressionsbereich, wie bei der gebräuchlichsten Anordnung im unteren Kokillenbereich (Variante „a“), bietet sich die technisch einfachste Lösung für die Kühlung an. Im Allgemeinen wird die Regel respektiert, dass die bei der Nutzung am stärksten belasteten Bereiche des Gussstückes im Boden der Form angeordnet sind, wenn eine solche Lage technologisch realisierbar ist. Diese Formbereiche erstarren am schnellsten, sind am weitesten von den Speisern entfernt und haben daher die feinste Struktur, welche durch den Dendritenarmabstand charakterisiert wird. Diese Formbereiche können bewusst und gezielt mehr gekühlt werden, ohne dass dies eine negative Wirkung auf die gelenkte Erstarrung hätte. Eine größere Erstarrungsgeschwindigkeit wirkt sich positiv auch auf die Menge von Volumendefekten aus. In den unteren Bereichen der Gießform ist eine kleinere Menge von Verunreinigungen als in den oberen zu verzeichnen. Sie schwimmen mit der Formfüllungsfront nach oben direkt zum Speiser.

Das System Gussstück-Gießform muss während des Gießens und Erstarrens nicht in einer stationären Lage bleiben, es kann auch eine andere Ausgangslage als die Waagerechte gewählt werden. Eine solche dynamische Gießweise, welche auch als Kippguss bezeichnet wird, wird aufgrund der günstigeren Bedingungen bei der Formfüllung ebenfalls genutzt.

Der Zylinderkopf ist ein sehr spezielles Gussstück. Deshalb ist die Gussstücklage bei der Technologieplanung eines der wichtigsten Kriterien. Die gewählte Technologie kann diese Lage aber auch direkt beeinflussen. Im Weiteren beeinflusst die Geometrie des Gießsystems, das Speisungssystem, die Erstarrungszeit und damit die Zykluszeit. Weitere technische Probleme sind die:

- Kernqualität (Maßgenauigkeit, Oberflächenbehandlung und -qualität, Festigkeit, Zerfall nach dem Abguss und weitere),
- Positionierung der Kerne in der Form und ihre Stabilität,
- Konturbehandlung (Schichten),
- Entlüftung des Formhohlraumes und die
- Abfuhr von Kerngasen.

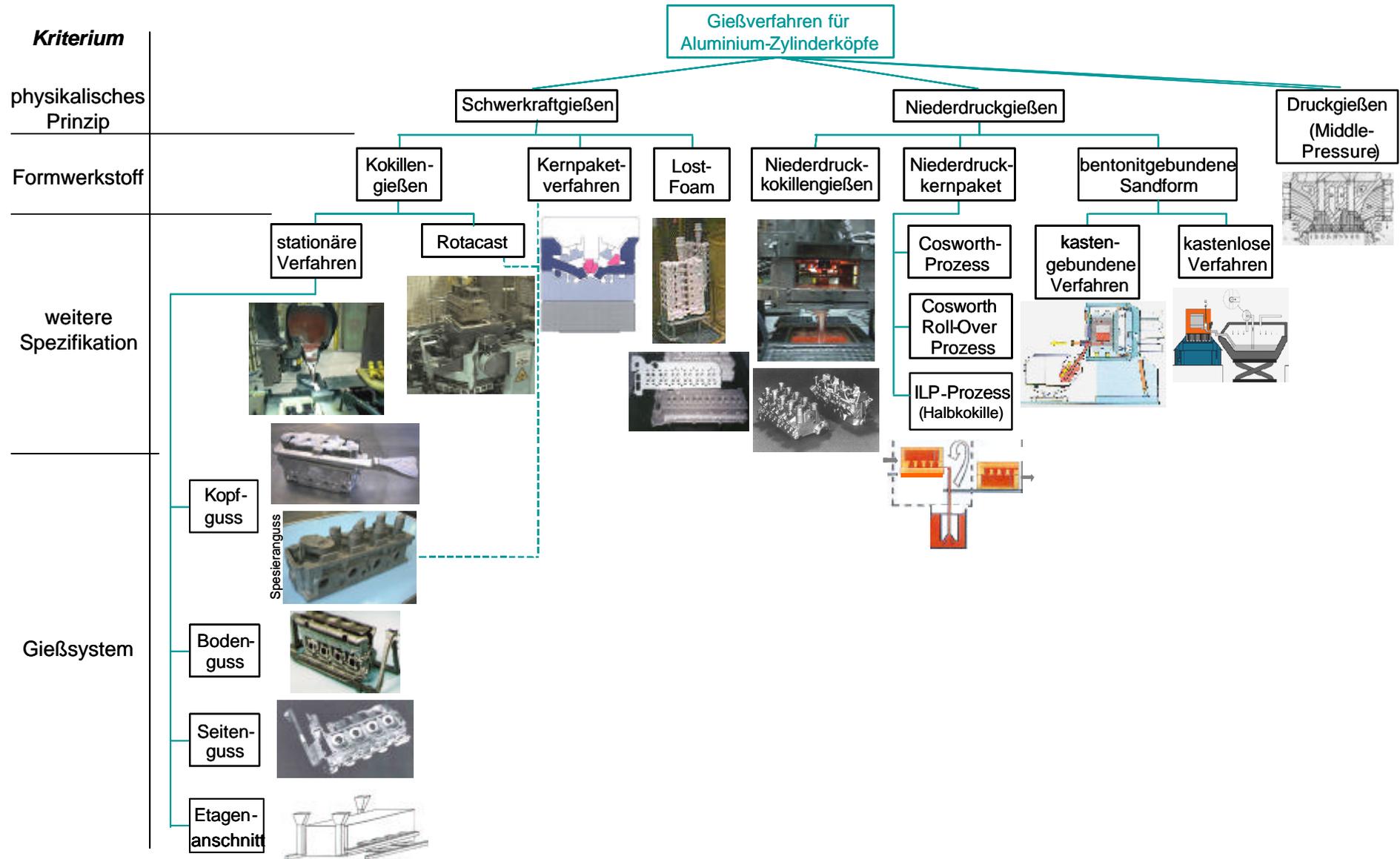


Bild 33 Gießverfahren für Aluminium-Zylinderköpfe

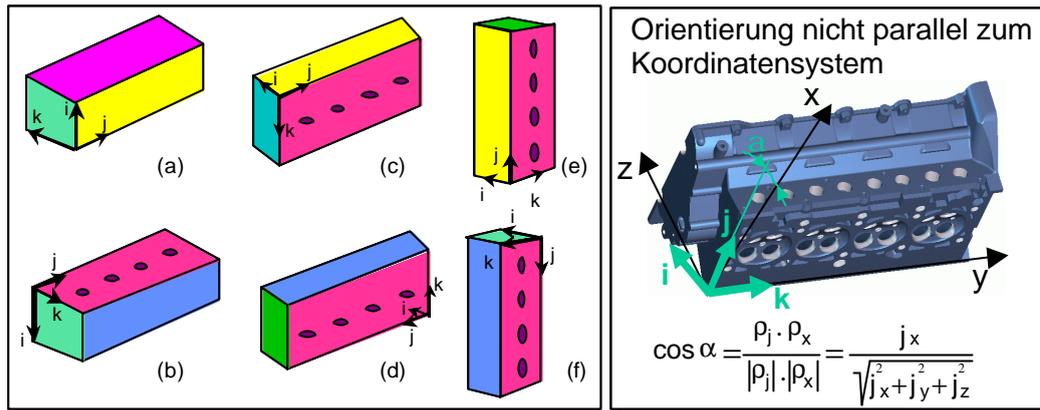


Bild 34 Möglichkeiten der Gießlagen-Orientierung

Die einzelnen Gießtechnologien lassen sich durch unterschiedliche Bewertungsmaßstäbe miteinander vergleichen. Dabei spielen vielseitige Auswahlkriterien eine Rolle. In einer Vergleichsmatrix sollten wir also eine Antwort auf die Frage bekommen, welche Technologie und warum diese die günstigste ist. Die Ausarbeitung einer solchen Matrix ist sehr kompliziert und in hohem Maße subjektiv. Weiterhin muss man die Technologien für ein ganz konkretes Gussstück bewerten und damit ist das Ergebnis nicht für das Gießen von Zylinderköpfen allgemein übertragbar. Folgendes Beispiel zeigt drei Gruppen von Bewertungskriterien:

Prozess – Investitionsvolumen, Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit, Produkt-/Werkzeugkosten, erreichbare Produktivität, Zuverlässigkeit, Einschränkung bei der Kernherstellung, Metallausbringen, Personalanforderungen (Anzahl und Qualifizierung), Flächen, Instandhaltung, Kondensatbildung (beim Kokillenguss),

Geometrie des Teiles – Beschränkung in der Anordnung, erforderlicher Platzbedarf im Bereich „Formgebung“, minimale Wanddicke und Wanddickenunterschiede, Maßgenauigkeit und Oberflächenbeschaffenheit, Speisbarkeit, Hinterschneidungen im Metallfließweg,

Metall (mechanische Eigenschaften) – Schmelzetemperatur, Schmelzetemperaturverluste, Formfüllungscharakter, gelenkte Erstarrung, Erstarrungsgeschwindigkeit.

Gleichzeitig ist es notwendig die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Kriterien zu beachten, Bild 35.

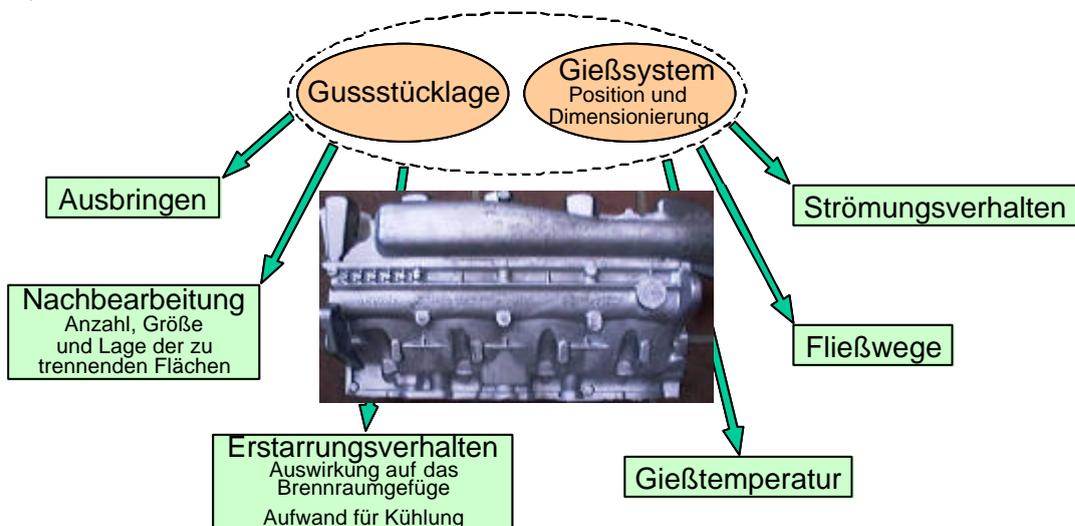


Bild 35 Bewertungskriterien der Form-/Gießlage und Gießsystemtechnik bei Zylinderköpfen

In der Fachliteratur trifft man auf unterschiedliche Bewertungen incl. Break-even-point-Bestimmung über das gesamte Spektrum von Gießverfahren zum Gießen von Zylinderköpfen [88-98]. Die Ergebnisse sind in der Anlage unter den Bildern 1 bis 9 und in der Tabelle 2 dargestellt. Charakteristisch ist ein ganz gezielter Vergleich mit sehr beschränktem Untersuchungsfeld und starker Subjektivität. Eine rein technisch orientierte Betrachtungsweise ohne wirtschaftliche Gesichtspunkte bei langfristig ausgerichteten Technologiestrategien ist unvollständig. Das Problem bei der Kostenbetrachtung liegt vor allem darin, dass die Kostenentwicklung einer Technologie im Vorfeld kaum real abschätzbar ist. In [5] wird eine Erfahrung erwähnt, dass neu eingeführte Technologien u.a. aufgrund der Steigerung der Komplexität der herzustellenden Teile, anfänglich häufig sehr teuer waren, im Laufe der Zeit aber durch intensive Optimierungsmaßnahmen deutlich preisgünstiger wurden.

Ein objektives Ergebnis ist nur durch einen Investitions- und Betriebskostenvergleich zur Herstellung von Zylinderköpfen bei Betrachtung aller Gießverfahren möglich. So ein Vergleich ist nicht allumfassend orientiert und berücksichtigt z. B. nicht die Fähigkeit der Methode zum Gießen von Teilen in gewünschter Qualität. In der Fachliteratur sind konkrete Ergebnisse zum globalen Vergleich der Gießverfahren von so hoch beanspruchten Teilen wie Zylinderköpfen nie veröffentlicht worden. Alleiniger Grund dafür ist ein Know-how Schutz der Automobilkonzerne und ihrer Zulieferer. Weiterhin ist jeder Zylinderkopf sehr speziell und damit einhergehend auch die Probleme bei seiner Herstellung. Daher sind die Ergebnisse nicht übertragbar auf andere Typen, auch wenn sie funktionell identisch sind. Bei den Zylinderköpfen gibt es deutliche Konstruktionsunterschiede zwischen den nachfolgenden Generationen, was selbstverständlich die Herstellungstechnologie direkt beeinflusst.

In [99] werden die einzelnen Gießverfahren diskutiert und mit konkreten Beispielen am Stand der Technik von Zylinderköpfen dokumentiert. Das Schwerkraftkokillengießen besitzt eine stabile Position auf dem breiten Feld von Gießverfahren zur Herstellung von Zylinderköpfen aus Aluminium. Andere, lange bekannte Gießverfahren zum Gießen von Zylinderköpfen wurden erst in den letzten Jahren eingesetzt und spielen nur eine untergeordnete Rolle bezogen auf die gesamte Stückproduktion in der Welt. Das Niederdruckkokillengießen ist eine Technologie zum Gießen bis zu Serien mittlerer Größe. Einige Technologien sind sehr spezifisch, so benötigt z. B. das Lost-foam-Verfahren keine Sandkerne zur Bildung der inneren Hohlräume. Die Fa. BMW hat dieses Verfahren in 8 Jahren entwickelt [100]. Diese Zeitspanne ist repräsentativ für die Anpassung eines relativ konventionellen Verfahrens für die Herstellung eines komplizierten Gussteiles wie es der Zylinderkopf ist. Das Verfahren Middle-Pressure ist sehr attraktiv durch die hohe Produktivität und die ausgezeichneten Werte des Dendritenarmabstandes ($12\mu\text{m}$ bei AlSi9Cu3) [88]. Ein Hindernis für dessen breiteren Einsatz ist neben anderen Faktoren die schwer lösbare Herstellbarkeit von Ansaugkanälen neuer Generationen. Es bieten sich auch Technologien an, die schon lange bekannte Technologien kombinieren, wie z. B. Rotacast [95,101-103]. Bei diesem Verfahren handelt es sich um Kippguss unter Schutzatmosphäre mit aktiver Druckluft-Nachspeisung nach dem Abguss. Die Produzenten von Gießanlagen zum Gießen in verlorenen Formen (kastengebundenen aber auch kastenlosen) haben ein hochproduktives Werkzeug auf dem Prinzip des Niederdruckgießens entwickelt und mit dem Zylinderkurbelgehäuse getestet. In der Kombination mit der optimierten Wärmebehandlung sind damit sehr zufriedenstellende mechanische Eigenschaften erzielbar [104-106]. Eine weitere Möglichkeit der Steigerung der mechanischen Eigenschaften bietet die Halbkokille [107]. Es bietet sich also ein potentielles Verfahren zum Gießen von Zylinderköpfen für niedrigvolumige Motoren (weniger belastete) an.

Das Niederdruckgießen, das Kontaktgießen [108,109], das Kippgießen oder die aktive Nachspeisung [110,111] sind alles Lösungen, die den Anteil von Inhomogenitäten in der Struktur senken sollen. Auch für den klassischen Schwerkraftkokillenguss ist die Orientierung auf diese Entwicklungsrichtung höchst aktuell.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Schwerkraftkokillengießen ein bewährtes Gießverfahren zur Herstellung von Zylinderköpfen für sparsame Niedrigvolumige aber auch Hochleistungsmotoren mit Perspektiven für die Zukunft ist. Mit diesem Verfahren ist eine kurze Erstarrungszeit nicht nur im Brennraum des Zylinderkopfes gesichert, wodurch ein niedriger DAS erreicht wird und damit eine gute Basis für die hohen mechanischen Eigenschaften gewährleistet werden kann. Aus dem Bild 5 der Anlage geht hervor, dass allein der DAS nicht der entscheidende Faktor zur Sicherung von hohen dynamischen Eigenschaften ist – siehe den mittleren Spannungsausgang für die druckgegossenen Proben. Die Mikrostruktur beeinflusst in bedeutendem Maße die gesamte Gießtechnologie, bei der die Strömungsphänomene eine wichtige Rolle spielen. Durch die Beherrschung der Strömungsvorgänge, die eine große Schwachstelle beim Schwerkraftkokillenguss ist, können die mechanischen Eigenschaften des Gussteils verbessert werden.

Die höheren Werkzeugkosten fordern große Stückserien. Eine hohe Produktivität und Prozesssicherheit wird durch einen hohen Automatisierungsgrad unterstützt.

5 Metalltransport

Die Transportvorgänge von flüssigem Metall zum Gießen oder Umschmelzen, mit ständiger Überwachung der Schmelzequalität (Bild 36) und parallel dazu die Bereitstellung von Form- bzw. Kernstoffen für den Abguss, sind wichtige Bestandteile der Gießerei.

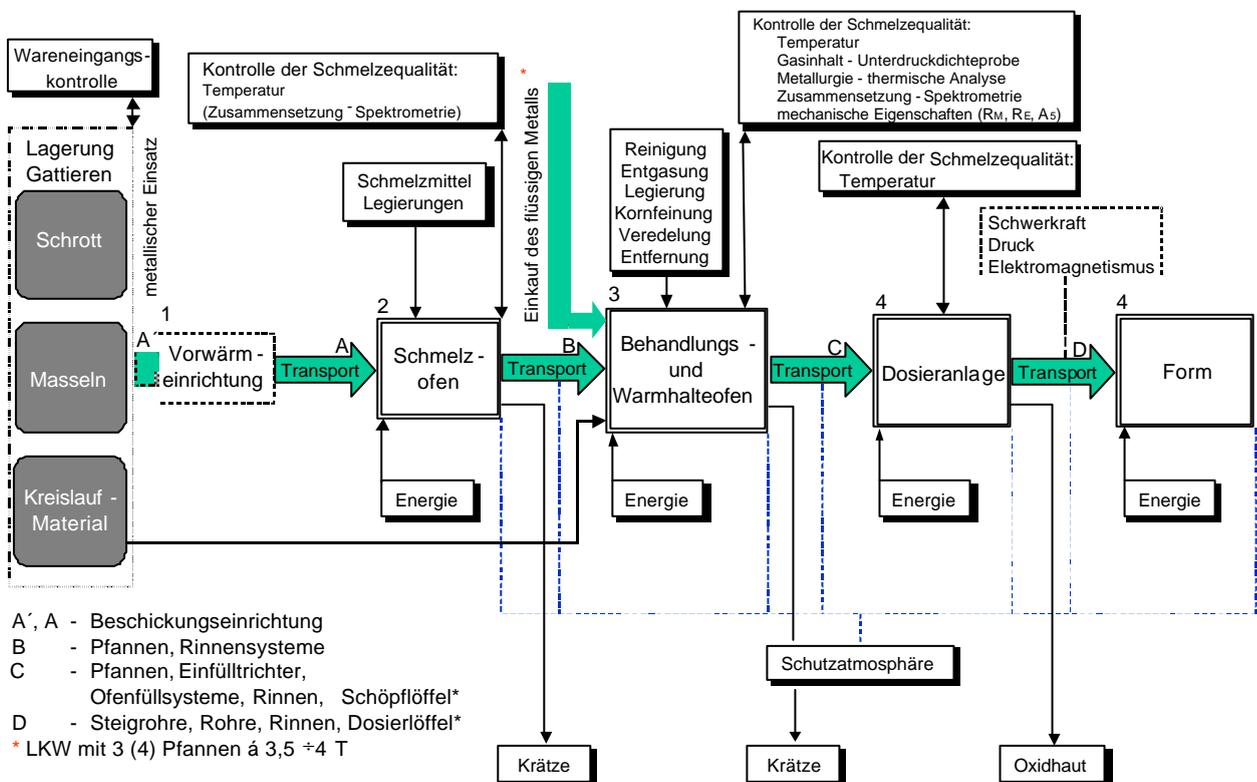


Bild 36 Verkettung der Prozessstufen in einer Al-Gießerei mit dem Schwerpunkt Schmelzetransport

Beim Schmelzetransport kommt es zu Effekten wie Temperatursenkung, Oxidation und Gasaufnahme, die die Qualität der behandelten Schmelze negativ beeinflussen. In [52] wurde das Zerwellen des Gießstrahles beobachtet und der Effekt des Mitreißens von Luft unter den Badspiegel durch den Gießstrahl beschrieben, Bild 37.

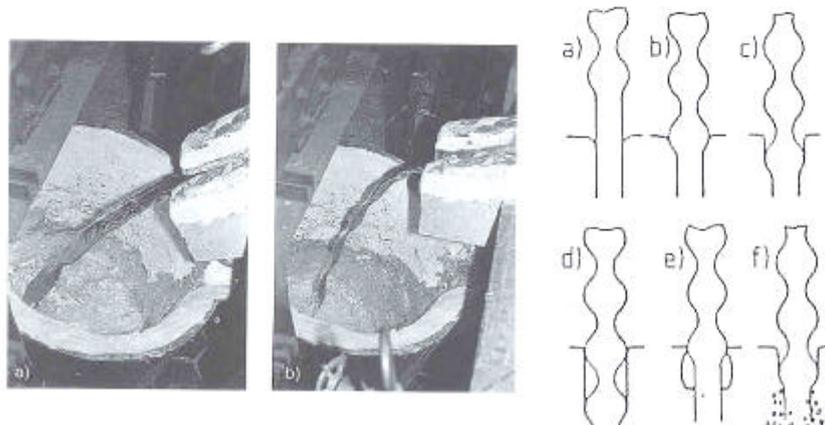


Bild 37 Ausbildung des Gießstrahles während des ersten Umfüllprozesses nach einer Gießzeit von 10s für eine kurze (a) und lange (b) erste Umfüllzeit und Mechanismus des Lufteintrages in die Schmelze [52, 63]

Im Bild 37 ist mittels der Phasen „a-d“ die Bildung von Turbulenzflecken oder Turbulenzballen bis unter den Schmelzespiegel dargestellt. Die Phase „e“ charakterisiert die Entstehung von instabilen, luftgefüllten toroiden Hohlräumen und die Phase „f“ den Zerfall des Luftvolumens in kleine Blasen, die sich impulsbedingt zunächst nach unten bewegen.

Geeignete Transportsysteme müssen daher folgende Anforderungen erfüllen:

- Gewährleistung einer gleichbleibenden Schmelzetemperatur (ideal $\Delta T = 0$), und Minimierung des Kontaktes mit der Atmosphäre (ideal kein Atmosphärenzugang),
- Sicherstellung einer turbulenzarmen (turbulenzfreien) Überführung des flüssigen Metalls vom Schmelzen/Schmelzebehandeln zum Vergießen.

Daraus resultieren kurze Transportzeiten/-wege, ruhige Umfüllvorgänge (niedrige Re-Zahl) und saubere Behälter und Werkzeuge.

Beim Kokillenguss entfällt der Transport von Formstoff. Allerdings sind gerade beim Gießen von Zylinderköpfen die Kernherstellung und der Transport der Kerne zu den Gießmaschinen von großer Bedeutung. Da die auftretenden Änderungen der Schmelzeigenschaften erst bei den auf die Schmelzebehandlung folgenden Transportvorgängen (Transport C und D, Bild 5.1) signifikante Einflüsse auf das Gussergebnis haben und eine Überwachung nicht mehr erfolgt, erscheint es notwendig besonders diese Prozesse zu verbessern.

In Bild 38 ist mit Pfeilen der Metalltransport beim automatischen Gießen dargestellt. Es handelt sich dabei um zwei Umfüllvorgänge mit nachfolgender Gießsystem- und Formhohlraumfüllung. Die dem Gießsystem zugeführte Schmelze ist durch das Strömungsvolumen Q charakterisiert, wobei die einzelnen Anschnitte aufgrund ihrer Lage und Geometrie mit $Q_{1...n}$ den Formhohlraum füllen. Nachdem der Gießlöffel unter den Badspiegel gesenkt wurde, wird er durch den Siphoneffekt im Warmhalteofen gefüllt. Anschließend wird die Schmelze dosiert in den Tümpel des Gießsystems abgegeben. Da die Schmelze dabei ständig im Kontakt mit der Atmosphäre ist, wird die Oxidation begünstigt. Die Gießroboter müssen mit ihrer Steue-

ung eine ruhige Löffelfüllung, einen ruhigen, aber schnellen Transport (Anbremsung in der Endposition) und einen präzisen Abguss unterstützen.

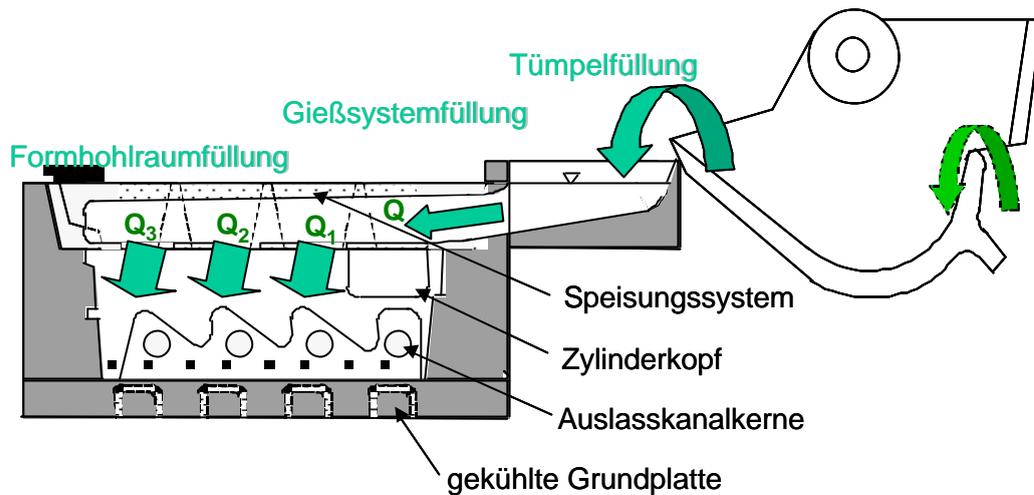


Bild 38 Schematische Darstellung des Metalltransportes beim Zylinderkopfguss

Bei der Auswahl geeigneter Transport- und Dosiersysteme müssen vielfach die vorhandenen Gießmaschinen und -werkzeuge, sowie die verwendeten Eingießsysteme am Werkzeug berücksichtigt werden. Generell kann festgestellt werden, dass für Gussteile eine Reihe unterschiedlicher Gießsysteme möglich ist, siehe Kapitel 6 und 9.3. Grenzen bestehen jedoch bei der Flexibilität der Vergieß- und Dosiereinrichtungen. Jedes Gießsystem besitzt charakteristische Merkmale, welche eine Anpassung der Dosier- und Vergießeinrichtungen erfordern bzw. bestimmte Anlagen favorisieren.

5.1 Gießtechnik in Gießereien

Die Anordnung der Schmelzanlagen, Warmhalteöfen, Dosiereinrichtungen und der Automatisierungsgrad beeinflussen den Transportweg der Schmelze, die Effektivität der Platzausnutzung, die Mitarbeiteranzahl, die Produktivität und die Arbeitsergonomie.

Das einfachste Beispiel eines effektiven Handgießplatzes ist ein Eaton-Gießkarussell, bei dem zwei Kokillen auf einem drehbaren Tisch platziert sind. Weitere Möglichkeiten zeigt das Bild 39, wo ein Gießroboter drei bis vier Kokillen bedient. Es sind maximal drei Kokillen in einer Reihe angeordnet, um die Temperaturunterschiede der dosierten Schmelze zwischen dem ersten und letzten Gießplatz minimal zu halten. Ein besonderes Merkmal der ersten Anordnung (Bild 39A) ist die gleichzeitig mit dem Füllen des Gießlöffels und Abgießen realisierte Entnahme bereits erstarrter Gussteile aus einer gegenüberliegenden Kokille. Bei der Tridem-Anordnung (Bild 39D) sind die Kokillen nicht neben- sondern hintereinander angeordnet. Das hat neben Vorteilen auch Nachteile. So führt eine solche Anordnung zu einem größeren Arbeitsrisiko, sie behindert die Putzarbeiten und die Kerneinlage bei den ersten zwei Kokillen in der Reihe. Des weiteren bleibt beim Wechsel z. B. der ersten Kokille die ganze Anlage stehen und die Gießmaschine kann beim Schmelzetransport die Kokillen verschmutzen. Die Transportwege von den Schmelzaggregaten zu den Gießmaschinen sind durch gestrichelte Linien gekennzeichnet. Die Systeme unterscheiden sich hinsichtlich der Länge der Transportwege sowie der eingesetzten Transportmittel. Es existieren Systeme,

bei denen aufgrund der günstigen Anordnung zu den Schmelzöfen Dosierrinnen eingesetzt werden.

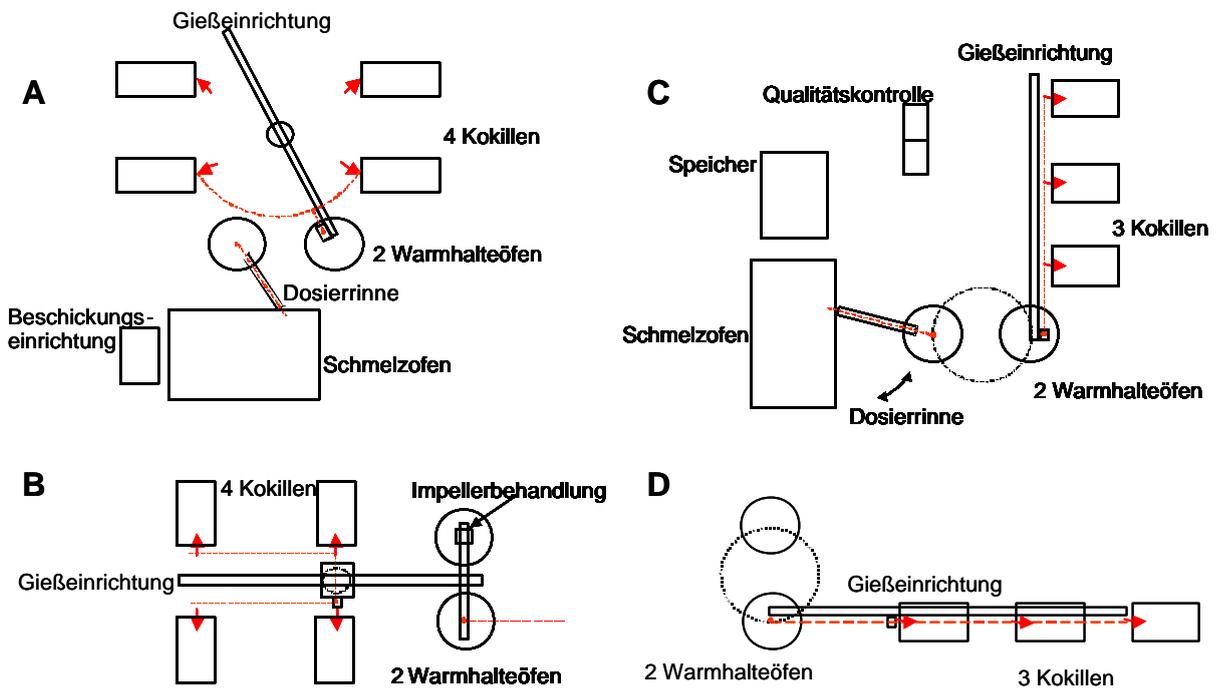


Bild 39 Vier unterschiedliche Anordnungen von Schmelz-, Behandlungs- und Gießaggregaten zum Kokillenschwerkraftgießen

Bei anderen Systemen erfolgt der Schmelzetransport mit Pfannen (Kran oder Gabelstapler), was ein zweifaches Umgießen der Schmelze zur Folge hat. Da die Schmelzebehandlung in jedem Fall nach diesen Transportvorgängen erfolgt, sind die Qualitätseinbußen (aufgrund Atmosphärenkontakt, Fallhöhe und Abkühlung) nicht so problematisch. Bei einer Schmelzebehandlung im Schmelzofen können diese Wirkungen jedoch merklichen Einfluss auf die erreichbare Gussteilqualität haben. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal der untersuchten Systeme ist die Produktivität. Eine hohe Stückproduktion erfordert Schmelzöfen mit hoher Schmelzleistung. Daher haben sich in Schmelzereien mit großer Schmelzleistung nur Gasöfen durchgesetzt. Die Verweilzeit der Schmelze im Warmhalteofen muss von kurzer Dauer sein um negative Effekte wie Gasaufnahme (nach der Schmelzebehandlung) zu reduzieren. Die effektivste Anordnung für Großserien ist die Platzierung von Kokillen auf einem Karussell, auch Gießrundtisch genannt. Meistens sind das sechs Kokillenmaschinen, wobei das Gießen und die Gusstückentnahme automatisch verlaufen, Bild 40. Es wird aufgrund der schnellen Taktzeit mit zwei Gießrobotern gegossen. Während des Gießens mit dem einen Roboterarm, wird der zweite Gießlöffel des anderen Roboterarms schon gefüllt. Die Kerne werden entweder von Hand, oder mit einem Roboter in die Kokille eingelegt. Da die Lage von Kanalkernen in sehr niedrigen Toleranzen liegt, ist eine Automatisierung sehr schwierig zu realisieren. Vor dem Abguss wird die Form noch einmal geöffnet, um die Sandreste aus dem Formhohlraum mit Druckluft zu entfernen und einen zufälligen Kernbruch zu erkennen. Bei der Gusstückentnahme wird visuell die Qualität des Gussteils kontrolliert und operativ werden technologische Maßnahmen realisiert.

Die Temperatursenkung, den Materialfluss und die Arbeitsaufgaben in der Schmelzerei und beim Warmhalten zeigt das Bild 41.

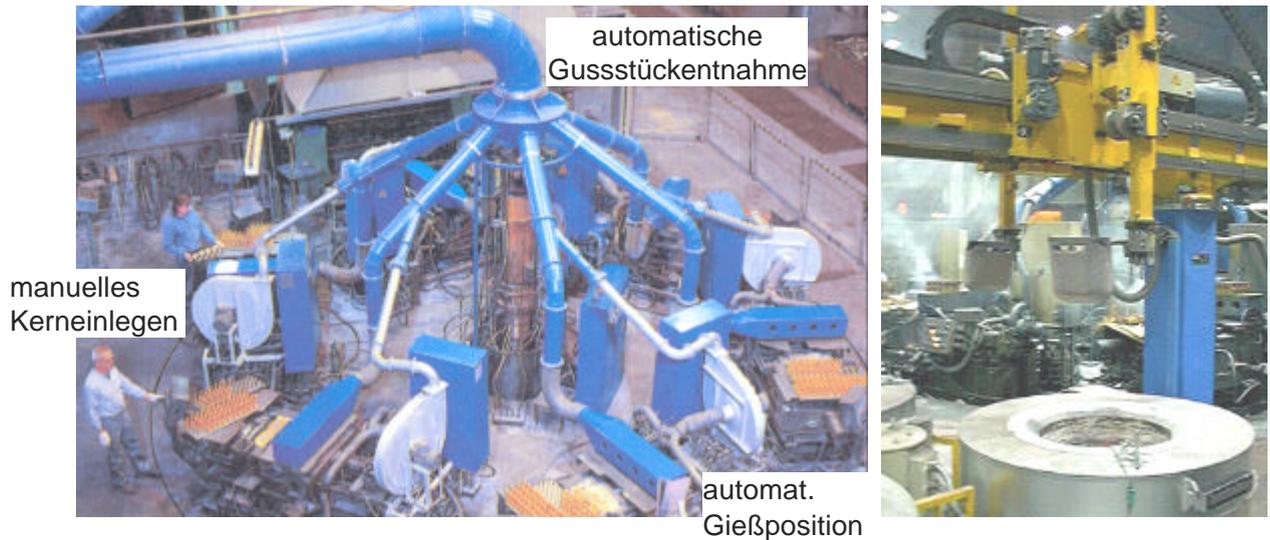


Bild 40 Gießkarussell mit sechs Kokillenmaschinen, manuellem Kerneinlegen und einem Gießroboter mit zwei Gießlöffeln

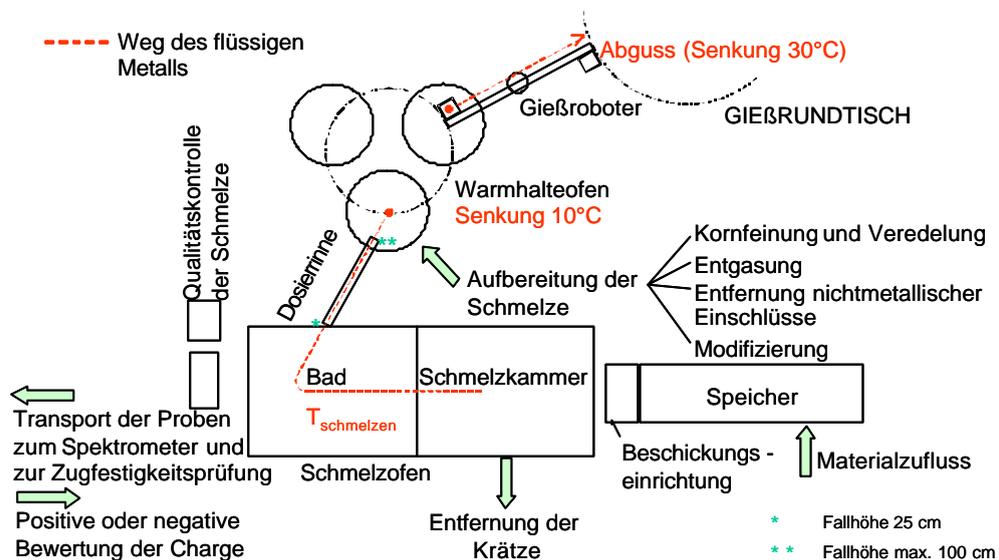


Bild 41 Metalltransportanalyse beim Schmelzen von Aluminium im Erdgasschachtofen und Gießen auf einem Gießkarussell

Die Gießeinrichtung kann auch eine stabile warmhaltende Anlage sein, die mit Überdruck auf der Badoberfläche und mit einer Rinne dosiert (z. B. Westomat). Diese Variante hat allerdings folgende Nachteile:

- nach dem Umfüllvorgang ist die Schmelze nicht mehr entgasbar und die Verunreinigungen sind praktisch nicht mehr zu entfernen,
- in der Rinne bleibt nach jedem Abguss eine großflächige Oxidhaut zurück, die entweder von Hand entfernt werden muss (höherer Arbeitsaufwand, schwächere Prozesssicherheit), oder sogar beim nächsten Abguss mitgerissen wird,
- die zum Boden sinkenden Verunreinigungen und schwere Phasen werden ständig mitgegossen.

Aus diesen Gründen ist die Anlage für das Gießen von hochbelasteten und anspruchsvollen Teilen mit hoher Dichte nicht die beste Lösung.

Auf die negative Wirkung der großen Fallhöhe beim Gießen von Aluminium weist in seinem Beitrag Fuoco hin [61], Bild 42. Durch eine größere Fallhöhe rollt sich die Oxidhaut an den Gießstrahl heran und im Fall c wird durch den Gießstrahl die Oxidhaut sogar mit der Luft in das Bad mitgerissen.

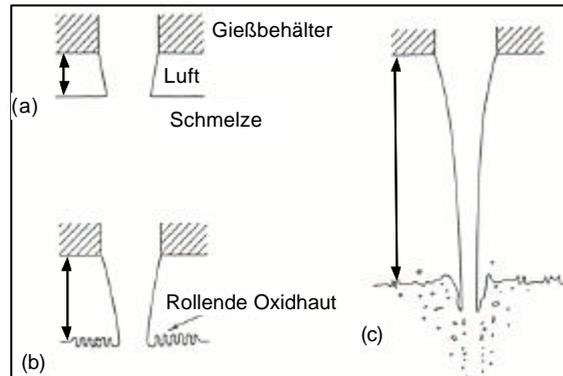


Bild 42 Illustrative Veranschaulichung des Effektes von steigender Fallhöhe beim Schwerkraftguss von Aluminium [61]

Bei Umfüllvorgängen zwischen Warmhalteöfen und Dosieröfen sowie zwischen Dosiereinrichtung und Eingusstümpel sind also große Fallhöhen zu vermeiden, Bild 43. Auch bei der Füllung von Dosierlöffeln ist eine ruhige Formfüllung zu realisieren. Dadurch können die Kontaktflächen zur Atmosphäre sowie das Einwirbeln von Oxiden reduziert werden. Die minimale Fallhöhe wird vom Pfannenbediener (Kran oder Gabelstaplerfahrer) oft beim Füllen des Dosierofens nicht beachtet.

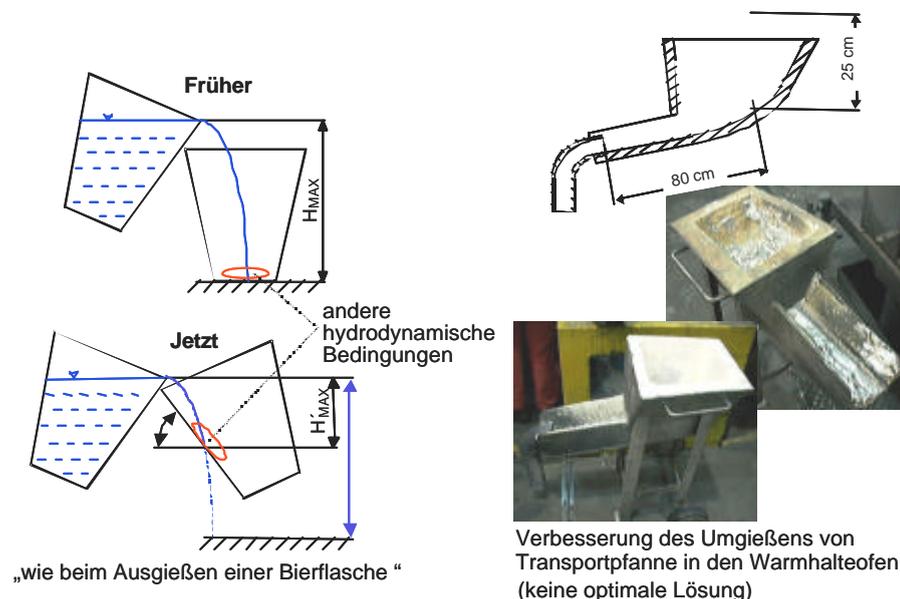


Bild 43 Umfüllvorgang soll bei minimalen Fallhöhen verlaufen

Im Patent [112] ist die Programmierung der Kippbewegung der Gießpfanne zur Beschickungsöffnung der Kokillengießmaschine beschrieben. Hier ist auch ein geeigneter Geschwindigkeitsregler, mit dem eine, wie sie von Hand realisiert wird, Verschwenkung erfolgen kann, dargestellt. Es ist beim raschen Eingießen notwendig, dass das Metall nicht zur Stauung kommt oder überfließt. Im Bild 44 ist das typische Geschwindigkeitsprofil beim Eingießen aufgezeigt. Die erste Geschwindigkeitsstufe dient zur Annäherung des Metalls an die

Ausgusstülle der Pfanne. Die zweite Stufe, mit geringerer Geschwindigkeit, dient zum langsamen Ausgießen des geschmolzenen Metalls und die dritte Stufe mit allmählicher Beschleunigung zum restlichen Ausgießen des gesamten geschmolzenen Metalls, incl. der Oxide aus dem Badspiegel und von Wänden des Behälters.

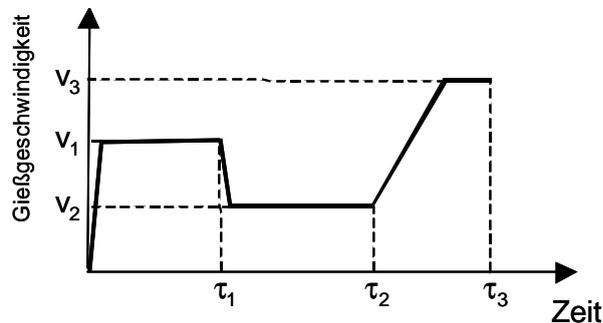


Bild 44 Geschwindigkeitsprofil beim Gießen mit einer Pfanne [112]

5.2 Kritische Bewertung des Metalltransports

Beim Schwerkraftguss kann die Qualität der Schmelze während des Transports vom Warmhalteofen zur Kokille durch die Kontaktzeit mit der Atmosphäre und zwei Umfüllprozesse wesentlich verschlechtert werden.

Die höheren Werkzeugkosten beim Kokillengießen erfordern große Stückserien. Hohe Produktivität und Prozesssicherheit wird durch einen hohen Automatisierungsgrad unterstützt. Die Gießmaschinen sind in Gießzellen angeordnet, was bei unzweckmäßiger Ausführung zu unterschiedlichen Qualitätsergebnissen von einzelnen Gießmaschinen oder ganzen Gießzellen führen kann. Als Ergebnis können bestimmte Gießmaschinenanordnungen empfohlen werden.

Die Schmelze soll gleichzeitig ruhig und in kurzer Zeit transportiert werden. Die Transportzeit zwischen den einzelnen Kokillen einer Gießzelle sollte mit einem anderen Temperaturregime des Werkzeuges ausgeglichen werden. Der Roboter sollte so programmiert und gesteuert werden, das ein langsames Anhalten an der Kokille und ein gleichmäßiger Abguss nach bestimmten Anforderungen realisiert wird. Eine große Fallhöhe soll bei allen Umfüllvorgängen vermieden werden. Dies wird durch eine niedrige Positionierung des Dosiergefäßes, den Einsatz einer Vorrichtung zwischen den Gießgefäßen oder auch die Positionierung des gefüllten Gefäßes zum Gießstrahl realisiert.

6 Gießsysteme beim Schwerkraftkokillenguss

Da sich die Arbeit mit der Optimierung des Metalltransportes in den und im Hohlraum von Dauerformen beschäftigt, ist es erforderlich, auch auf die Bewertung der unterschiedlichen Gießsysteme einzugehen. Hierbei sind die gleichen Kriterien wie beim Vergleich von Gießverfahren anzuwenden. Dazu ist es notwendig, erst ein Gießsystem zu definieren und seine Funktion anzugeben. Im Zusammenhang mit dem Metalltransport in der Gießform sind für das System von Behältern und Kanälen drei Begriffe definiert [49,113].

- Man versteht unter einem **Gießsystem** die Gesamtanordnung der Zuführung der Schmelze vom Einguss- bis zum Formhohlraum.

- Das **Anschnittsystem** ist die Gesamtheit aller Strömungskanäle, die in einer Gießform das Gießmetall zum Formhohlraum führen.
- Das **Eingusssystem** besteht im Normalfall aus Einguss, Eingusskanal, Lauf und Anschnitten und erfordert die Beachtung der Gesetzmäßigkeiten der Strömungslehre.

Aus den Definitionen geht hervor, dass unter Anschnittsystem, Gießsystem und Eingusssystem dasselbe zu verstehen ist. In der Arbeit wird im Weiteren nur der Fachbegriff „Gießsystem“ verwendet. Auch das Metall, welches diese Kanäle ausfüllt und darin erstarrt, bezeichnet man als Einguss-Abfallprodukt der Fertigung, das sogenannte „Rücklaufmaterial“, das den metallischen Einsatzstoffen erneut zugeführt wird [114]. Die Abmessungen der Gießsysteme zusammen mit dem Speisungssystem bestimmen die aus den wirtschaftlichen Sicht wichtige Kennzahl des Gussstückausbringens.

Die Funktion des Gießsystems ist es, die Erzeugung von Gussstücken mit guten Oberflächen, genauen Kanten und Konturen sowie ohne Luftansaugung und nichtmetallische Einschlüsse zu gewährleisten. Aus diesem Grund ist die Form in einer optimalen Zeit zu füllen (möglichst schnell). Die Formfüllung ist von spezifischen Merkmalen des Gussstücks abhängig und durch die Abmessungen des Gießsystems zu sichern. Mit anderen Worten: Es wird gleichzeitig eine schnelle und ruhige Formfüllung gefordert, was eines der schwierigsten Probleme beim Gießen überhaupt darstellt.

Das Gießsystem muss dazu beitragen, dass nur sauberes Metall in die Form gelangt und dass Formfüllung und Erstarrung in der gewünschten Weise ablaufen. Bei der Behandlung von Al-Legierungen entsteht eine Krätze, die aber in keinem Fall in ein Dosiergefäß (Löffel, Kelle) oder Steigrohr gelangen darf. Diese soll vollständig von der Metallbadoberfläche in Warmhalteöfen entfernt werden. Das Gießsystem kann auch in bedeutendem Maße das Temperaturfeld der Form beeinflussen. Im Fall der Zylinderkopfherstellung aus Al-Legierungen mit konventionellen Gießsystemen gelangen zwei Gießsystemfunktionen nicht zur Anwendung. Dies ist zum einen die Speisungsfunktion während des Erstarrens und zum anderen die Funktion der Sicherung eines genügend hohen hydrostatischen Druckes, um Luft- und Gaseinschlüsse im Gussstück zu vermeiden und einen vollständigen Guss zu gewährleisten.

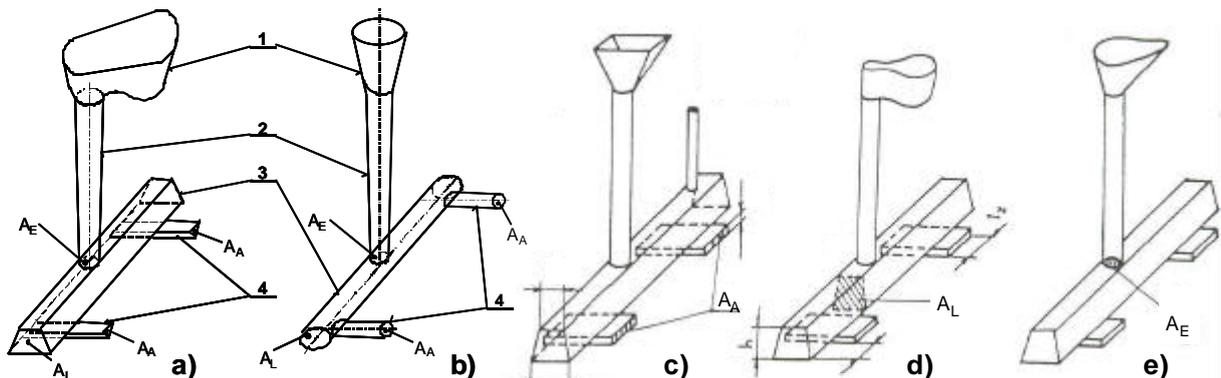
Die Elemente des Gießsystems werden in der Fachliteratur meist für den Abguss von Eisenlegierungen beschrieben. Es handelt sich um folgende:

<i>Einguss</i>	Er ist der erste Teil des Eingusssystems, in dem die Schmelze eingegossen wird und hat die Aufgabe, die Schmelze aufzunehmen und an den Lauf bzw. an die Anschnitte weiterzuleiten [49].
<i>Gießstümpel</i>	Er ist das Aufnahmeelement eines Gießsystems, in das die Schmelze einfließt und wird beim Gießen von Formen mit hohen Gießleistungen verwendet [49,114].
<i>Gießtrichter</i>	Er ist ein anderes Aufnahmeelement eines Gießsystems und wird beim Gießen von Formen mit relativ kleinen Gießleistungen verwendet.
<i>Gießkanal</i>	Einlaufkanal, Stempel oder Stehlauf bezeichnet und verbindet den Einguss mit dem Lauf; er führt in der Regel senkrecht nach unten [49].
<i>Lauf</i>	Er wird auch als Zulauf oder Gießlauf bezeichnet; es handelt sich dabei meist um einen waagrecht angeordneten Kanal, der den Übergang vom Einguss zu den eigentlichen Anschnitten darstellt [49].

Anschnitt

Er ist der (Auslauf) Gießkanal, der unmittelbar in den Formhohlraum mündet [49].

Die Einteilung der Aufnahmeelemente nach [49,114] ist nicht zufrieden stellend, da der Gießtumpel auch für niedrigere Gießleistungen (Gussstücke unter 100 kg) angewendet wird. Dient das Aufnahmeelement der Schlackezurückhaltung, wird es als Gießtumpel bezeichnet. In den anderen Fällen beschreibt die Literatur das Aufnahmeelement als Gießtrichter. Die Aufnahmeelemente von Gießsystemen können wesentlich kompliziertere Formen annehmen. Dies wird deutlich an einem Gießtumpel mit Bremsfunktion, welcher an den Gießsystemen für disamatische Formanlagen zu finden ist. Das Bild 45 stellt die Hauptkomponenten von Gießsystemen für Eisen- und Aluminiumlegierungen schematisch dar. Die Elemente des Kopfgussgießsystems werden ausführlich im Kap. 6.4.2 beschrieben.



für Gusseisen

für Stahlguss

1... Gießtumpel

1... Gießtrichter

2... vertikaler Eingangskanal

2... vertikaler Eingangskanal

3... Schlackenlauf

3... horizontaler Gießlauf (Verteiler, Kollektor)

4... Anschnitte

4... Anschnitte

Bild 45 Typische Gießsysteme zum Gießen von Eisenlegierungen *a* und *b*, und zum Gießen von Al-Legierungen *c* bis *e* [49, 115]

Praktisch existiert keine Fachliteratur, die sich systematisch mit den Gießsystemen auf Basis der fallenden Gießweise für das Gießen von Al-Legierungen in Kokillen beschäftigt. Friedrich Nielsen schreibt in seinem Buch [113] nur über den Bodenguss. Die Fachliteratur, z. B. [19], übernimmt praktisch die von Nielsen formulierten Regeln und Maßnahmen für die Konstruktion des Gießsystems. Aus der Arbeit von Nielsen gehen eine ganze Menge von praktischen Schlussfolgerungen hervor, die auch für die fallende Gießweise gelten. So vor allem die Anforderung an die Auslegung des Einlaufkanals nach dem Fallgesetz. Dadurch wird die oxidationsempfindliche Aluminiumschmelze metallurgisch optimal geführt, der sich bildende Oxid-schlauch haftet an der Formwand und diese Oxide werden nicht ins Bauteil geschwemmt. Weiterhin hat Nielsen den sogenannten Bremslauf, unter Berücksichtigung mehrere Bremsstufen, definiert. Sowie die Gesetzmäßigkeiten der Strömungslehre für alle Einzelheiten des Gießsystems angewandt. Er spricht über eine **äußere** und **interne Turbulenz**. Was ist eigentlich eine turbulente Strömung und womit ist Turbulenz messbar? Die turbulente Strömung ist im Gegensatz zur laminaren Strömung eine wirbelhafte Strömung. Als Beurteilungsgröße dient eine maßgebende Veränderliche - die Reynolds-Zahl [116]. Die Reynolds-Zahl ist eine dimensionslose Größe in der Strömungsmechanik – sie stellt das Verhältnis der Trägheitskräfte zu den Zähigkeitskräften dar:

$$Re = \frac{vR}{\eta} \quad (6)$$

oder

$$Re = \frac{\text{Diffusionszeit des Impulses}}{\text{Konvektionszeit des Impulses}}$$

Beträgt diese mehr als 3000, ist die Strömung fast immer turbulent und oberhalb einer Reynolds-Zahl von 14000 ist sie ausnahmslos turbulent [117]. In Strömungen mit einer großen Reynolds-Zahl ist der konvektive Impulstransport dominant. Im Gegensatz dazu sind in Strömungen bei einer kleinen Reynolds-Zahl die Kräfte zur Viskosität und der zugehörige diffusive Transport dominant. Die Reynolds-Zahl ist nur ein qualitativer Maßstab der Turbulenz.

Die kritische Reynolds-Zahl wird für ganz konkrete Geometrien experimentell ermittelt und daher gilt sie z. B. nicht allgemein für die Bewertung der Strömung einer Al-Legierung. Die Einhaltung kleiner Reynoldszahlen und die damit verbundene Gewährleistung von laminaren Strömungen kann durch die Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe der Re-Berechnung kontrolliert werden. In der Tabelle 3 sind die zulässigen Werte einzelner Reynoldszahlen für Elemente des Gießsystems dargestellt.

Tabelle 3 Zulässige Werte der Reynoldszahl und der Trägheitskräfte für die Elemente des Gießsystems [73]

Formkomponent	Vertikaler Eingusskanal	Horizontaler Gießlauf	Anschnitte	Form	
				einfache	komplizierte
Re-Zahl	43 500	28 000	7 800	2 600	780
$v R = Re \eta$ [cm ² s ⁻¹]	65,25	42	11,7	3,9	1,17

Unter Viskosität versteht man den inneren Reibungswiderstand, den eine Flüssigkeit einer Deformation durch Druck- oder Schubspannung entgegensetzt. Zweckmäßiger als die dynamische ist die kinematische Viskosität, die auch die Dichte der Flüssigkeit betrachtet. Die Viskosität der Schmelze steigt stark mit sinkender Temperatur, was das Fließvermögen der Schmelze negativ beeinflusst. Während des Gießens von Al-Legierungen in Kokillen verliert die Schmelze schon im Gießsystem viel Wärme. Daher ist es erforderlich, die Dauerformen zu temperieren. Bei ausreichender Schmelze-Überhitzung, einer geeigneten Kokillentemperatur und der notwendigen Vereinfachung der Berechnungen kann man die Viskosität konstant halten.

Es ist notwendig zwischen Massengeschwindigkeit bzw. Volumenformfüllungsgeschwindigkeit und linearer Geschwindigkeit sich bewegender Schmelzen zu unterscheiden. Die lineare Geschwindigkeit bestimmt den Strömungscharakter (laminar, turbulent), d. h. sie bestimmt die maximal zulässige Formfüllungsgeschwindigkeit (v_{\max}). Die Massengeschwindigkeit G [g s⁻¹] bzw. die Volumenformfüllungsgeschwindigkeit Q [cm³ s⁻¹], bestimmen die minimal zulässige Füllungsgeschwindigkeit (v_{\min}), bei welcher sich die Schmelze nicht auf die Temperatur der Null-Fließbarkeit abkühlt.

In [118] wird der Begriff „Oberflächenturbulenz“ benutzt. Runyoro u. a. [119] definieren die maximale Geschwindigkeit der Schmelze mittels der Gleichung:

$$v_{\max} = \sqrt{2 \frac{s}{r \rho}} \quad (7)$$

Das Bild 46 zeigt schematisch die Bilanz. Im Gleichgewicht stehen der innere Druck und der Kohäsionsdruck. Für flüssiges Aluminium beträgt die Oberflächenspannung $\sigma \approx 1 \text{ N m}^{-1}$, die Dichte $\rho \approx 2500 \text{ kg m}^{-3}$ und die Tropfen-Abmessungen weisen einen Umfang von $r \approx 2,5 \div 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ auf. Schon eine Geschwindigkeit von ungefähr $0,5 \text{ m s}^{-1}$ verursacht theoretisch eine **Oberflächenturbulenz**. Praktisch erzeugt die feste Phase an der Oberfläche – die Oxidhaut – noch einen Widerstand.

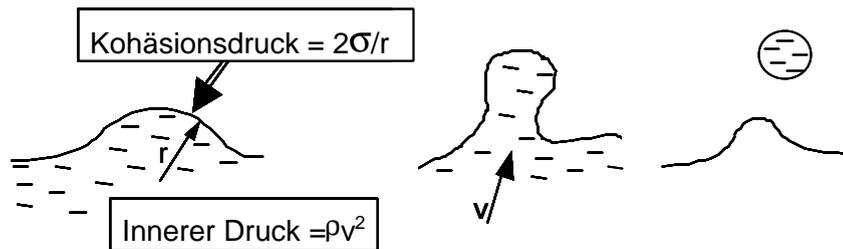


Bild 46 Kräftegleichgewicht auf der Grenzfläche; die Trägheitskräfte infolge der Geschwindigkeit haben einen Hang zum Oberflächendurchbruch, aber die Oberflächenspannung leistet Widerstand [119]

In [120] wird ein Experiment beschrieben, in welchem die große Rolle von Oxidhäuten an der Oberfläche von Aluminiumlegierungen bestätigt wird. In Bezug auf die Faktoren im Zusammenhang mit den Schmelzeigenschaften wird das Fließvermögen von Schmelzen durch die Oberflächenspannung beeinflusst. In Wirklichkeit ist bei der Widerstandüberwindung des Metalls beim Eintritt in ein Rohr eine weitaus größere Kraft notwendig, weil außer der Oberflächenspannung noch der Widerstand von Oxidhäuten zu überwinden ist. Für den Eintritt der Schmelze mit Oxidhaut in ein Rohr mit einem Durchmesser von 4 mm ist es notwendig, einen metallostatischen Druck entsprechend der Höhe von 53 mm zu erreichen. Demgegenüber beträgt dieser zur Überwindung der Oberflächenspannung bei einem Randwinkel von 45° und der Oberflächenspannung $\sigma = 520 \cdot 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$ nach der Gleichung:

$$h = \frac{2s \cos \Theta}{r \rho g} \quad (8)$$

die „kapillare Steighöhe“ nur etwa 14 mm. Die Oberflächenspannung von Aluminium mit Oxidfilm beträgt nach [121] $0,85 \text{ N m}^{-1}$. Bei einem solchen Wert ergibt sich eine kapillare Steighöhe von 22 mm. Hieraus geht hervor, obwohl die Ziffern nur angenähert sind, dass der Widerstand von Oxidhäuten eine größere Rolle als die Oberflächenspannung bei der Formfüllung von Aluminiumlegierungen spielt. Da die Oxidhaut auf flüssigem Aluminium sehr fest ist, wird diese Eigenschaft bei der Herstellung von Aluminiumdrähten nach Golovkin ausgenutzt [120].

Abdeck- und Raffinationsmittel für Al-Schmelze lassen sich einfach von der Badoberfläche entfernen und gelangen im allgemeinen nicht mit in den Formhohlraum. Daher sind Gießsysteme für Aluminium anders aufgebaut als Gießsysteme für Eisenlegierungen. Andererseits können Al-Legierungen sehr leicht oxidieren. Das bringt enorme technologische Probleme beim Gießen von Aluminium mit sich. Die entstehenden Oxide haben eine **höhere** Dichte als die Schmelze und steigen daher nicht zur Badoberfläche, wo sie leicht entfernbar wären. Bei

ruhiger Strömung schützt die Oxidhaut aus Al_2O_3 die Schmelze vor weiterer Oxydation, wohingegen bei der Oberflächenturbulenz die Oxidhaut **aufreißt** und zusammen mit Luftblasen in das Metall eindringt. Diese Oxidhaut wird mit keramischen Schaumfiltern, platziert im Umgießtrichter oder im Gießsystem, zu großen Teilen zurückgehalten. Zur Verhütung der unerwünschten Effekte wird empfohlen, in flache oder mit Stopfen verschlossene Tümpel zu gießen, eine ruhige Metallzufuhr durch sich erweiternde Siphon-, Schlitz- oder Etagengießsysteme zu sichern und fließende Querschnittsübergänge zwischen den Gießkanälen vorzusehen. Rabinovic empfiehlt bei der Anwendung von Kopf- oder Seitengießsystemen Fallhöhen von über 100 bis 150 mm zu vermeiden.

Im Bild 47 sind Beispiele von Gießsystemen, die eine ruhigere Formhohlraumfüllung sichern dargestellt. Im Fall c wird durch einen keramischen Schaumfilter die dynamische Energie der fallenden Schmelze abgebaut, d. h. der Gießstrahl wird beruhigt. Diese Praxis wird beim Gießen von Zylinderköpfen bei Skoda realisiert [122]. Das Grundkriterium für die Beispiele d und e ist der Kontakt zwischen der Schmelze und den Wandflächen bzw. der gefüllten Strömungsquerschnitte.

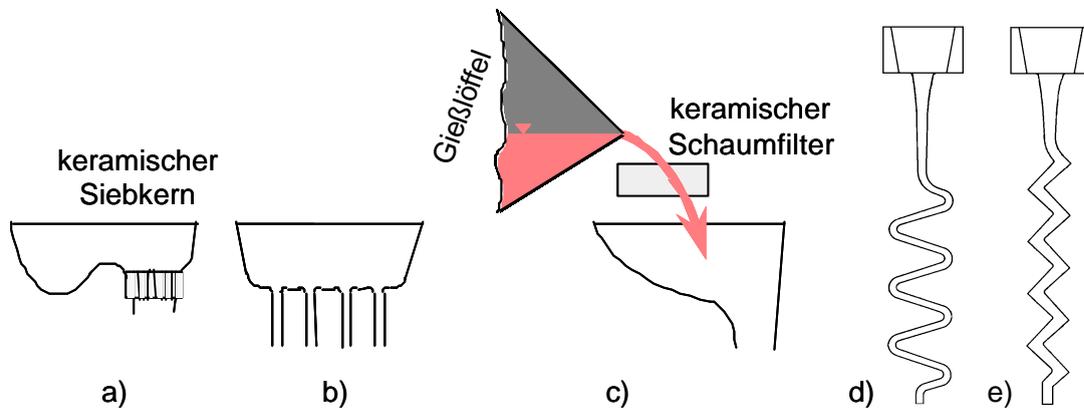


Bild 47

a)	Einsatz von einem Siebkern oder einem Gewebefilter
b)	geteilter Einlaufquerschnitt
c)	Einsatz von einem Schaumfilter
d)	„Schlangenlauf“
e)	Z-förmiger Eingießkanal

Bekannt oder realisierbar sind folgende Anschnittmöglichkeiten:

- Bodenguss mit einseitigem Gratanschnitt,
- Bodenguss mit beidseitigem Gratanschnitt,
- Etagenanschnitt,
- Seitenguss mit senkrechtem Schlitzanschnitt,
- Kopfguss mit einseitigem Gratanschnitt,
- Kopfguss mit beidseitigem Gratanschnitt,
- Speiseranguss.

Der Etagenanschnitt kann im Extremfall als die Kombination aus Bodenguss- und Kopfguss-systems ausgeführt sein.

Art und Geometrie des Gießsystems für das Gießen von Zylinderköpfen werden bezüglich der Lage des Gussstückes in der Form gewählt. Bei der folgenden Erläuterung wird davon ausgegangen, dass der Zylinderkopf nach dem Schwerkraftguss gegossen wird.

6.1 Bodenguss

Der Bodenguss ist in der Gießereipraxis die verbreitetste Art eines Gießsystems, das auch aus Sicht der theoretischen Beschreibung in der Fachliteratur weitreichend verarbeitet wird [123-131]. Das Metall füllt erst das Gießsystem, in welchem sich vorher die Strömung definieren lässt und erst danach fängt durch die Anschnitte die Formhohlraumfüllung an. Solche Gießsysteme gliedern sich in Überdruck- und Unterdrucksysteme. Die Auswahlkriterien sind die Gießleistung und der Typ des zu vergießenden Metalls.

Das **druckbeaufschlagte** System (gefülltes) ist typisch für das Gießen von Gusseisen. Den kleinsten Querschnitt des ganzen Gießsystems haben die Anschnitte. Die Anschnittsgeschwindigkeit des Metalls ist relativ hoch. Das Flächenverhältnis von einzelnen typischen Querschnitten in Kanälen lässt sich wie folgt beschreiben:

$$A_E : A_L : A_A = 1 : 0,9 : 0,8; 1 : 0,7 : 0,5$$

Das **drucklose** System (nichtgefülltes) ist günstig für große Gussstücke oder für das Gießen von leicht oxidierenden Metallen. Die Schmelze trifft über die Formwand in den funktionellen Formhohlraum; den größten Querschnitt haben im System die Anschnitte. Bild 41b zeigt den sehr kleinen Querschnitt A_E . Der fallende Kanal wird schnell gefüllt und verhindert damit, im Vergleich zum Überdruckgießsystem, das Mitreißen von Luft durch den Schmelzestrom. Das Flächenverhältnis von einzelnen typischen Querschnitten in Kanälen für das Gießen von Al-Legierungen lässt sich nach [132] wie folgt beschreiben:

$$A_E : A_L : A_A = 1 : 2 : 3; 1 : 2 : 4; 1 : 2,5 : 6,5; 1 : 4 : 4$$

Die Strömungsgeschwindigkeit kann in den Bereichen hinter dem Einguss durch entsprechende Dimensionierung der Strömungsquerschnitte bei drucklosen Gießsystemen geregelt werden. Die Höhe der Gießpfanne zum Einguss hat ebenfalls eine große Wirkung auf die Strömungsgeschwindigkeit.

Die Füllung des Formhohlraumes durch den Bodenguss ist im Bild 48 ersichtlich. Um zu erläutern, wie die Gießkanäle aufzubauen sind, sind folgende Einzelheiten zu betrachten:

1. der Übergang des freien Gießstrahls in den Gießtümpel,
2. die Bewegung des Metalls in senkrechten Eingusskanälen,
3. die Bewegung des Metalls in waagerechten Gießläufen,
4. die Bewegung des Metalls beim Einströmen in den Hohlraum der Gießform aus den Anschnitten.

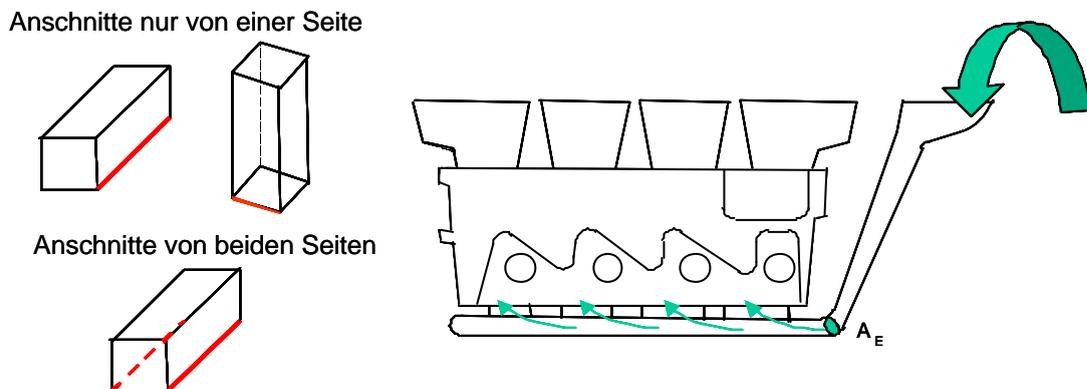


Bild 48 Bodengussprinzip für Zylinderköpfe

Beim Bodenguss werden die Zylinderköpfe in der Praxis überwiegend von beiden Seiten angeschnitten. Interessant ist die unterschiedliche Anzahl von Anschnitten auf beiden Seiten des Teiles. Der Einguss kann auch in der Form eines Fülltrichters ausgeführt sein.

Beispiele aus der Praxis zeigen, dass auch Varianten gehandhabt werden, die die Brennraumseite anders orientieren als das Bild 48 zeigt. So ist der Zylinderkopf eines tschechischen Herstellers (Bild 49b) in der Kokille so angeordnet, dass der Nockenwellenraum in der Kokille unten ausgebildet wird, d. h. der Brennraum befindet sich direkt unter dem Speiser. Die Kontur des Speisers wird durch einen festen und einen beweglichen Teil der Kokille gebildet. Der bewegliche Teil wird an der Seite mit Speiserschlichte isoliert und der untere Bereich formt die Brennraumkontur, die möglichst schnell erstarren soll. Das ist ein Beispiel einer ungünstigen Wahl der Zylinderkopflage in der Form, in Kombination mit dem Gießverfahren/-system.

Aus dem Bild 49 kann man einige charakteristische technologische Unterschiede in der Konstruktion von Gießsystemen ableiten. Z. B. besteht die Möglichkeit den fallenden Gießlauf unterschiedlich auszuführen. Beispielhaft sind auch die Anordnung und die Form von Speisungssystemen. So werden bei dem Zylinderkopf (Bild 49c) die Seitenwände gar nicht gespeist. Die Aufnahmeelemente in den Bildern 49c und 49d sind trichterförmig. Im Bild 49b handelt es sich um einen typischen Gießstümpel für den Bodenguss von Aluminium. Die Anschnitte sind in einer horizontalen Ebene oder unter einem Winkel an das Gussstück angebunden (Bild 49b). Der Laufquerschnitt in den Bildern 49a und 49b hat zwischen den ersten und letzten Anschnitten eine unterschiedliche Geometrie, welche Einfluss auf den Strömungscharakter besitzt (Senkung der Strömungsgeschwindigkeit). In der Tabelle 4 sind einzelne Unterschiede der Gießsysteme gegenüber gestellt.

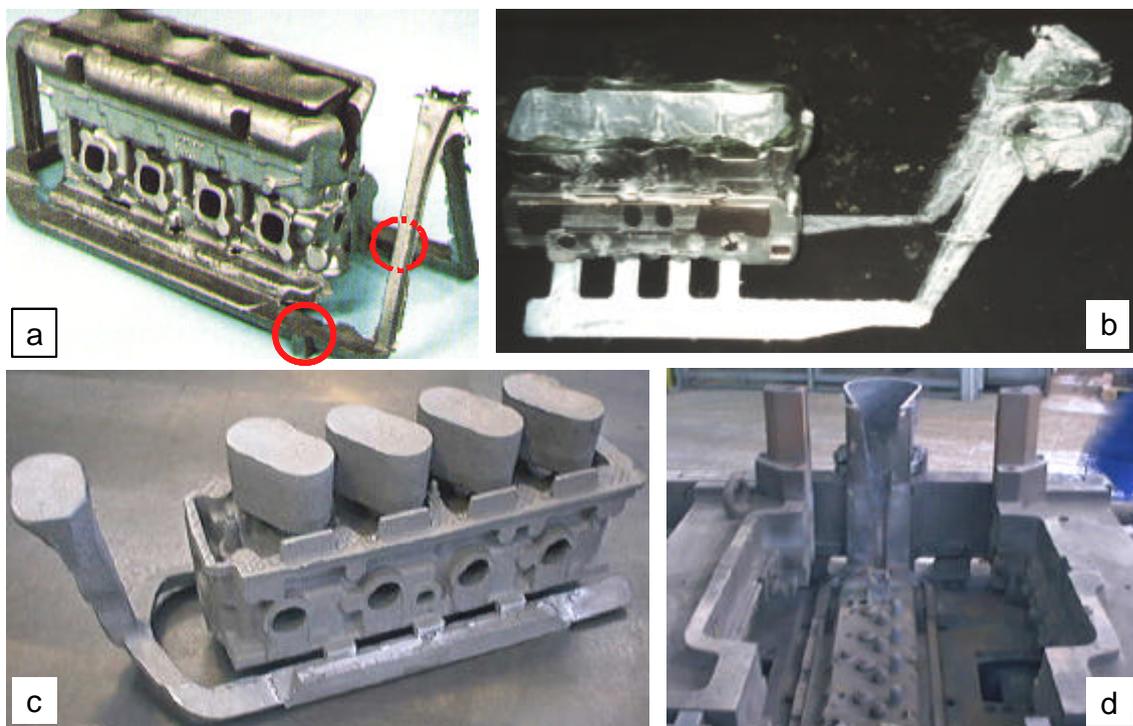


Bild 49

- a) Zylinderkopf mit Keramikfilter im Gießsystem (Volvo)
- b) Zylinderkopf mit Gießsystem, Brennraumseite oben (Skoda)
- c) Zylinderkopf mit Gießsystem (GM)
- d) Kokille zur Zylinderkopferstellung nach dem Bodengussprinzip

Tabelle 4 Legende zum Bild 49

	<i>Aufnahmeelement</i>	<i>Gießlauf</i>	<i>Filtereinsatz</i>	<i>Überlauf</i>
Bild 49a	1	2	Ja	Ja
Bild 49b	2	2	-	-
Bild 49c	1	1	-	-
Bild 49d	1	1	-	-

Das Gießsystem (Bild 49a) verfügt in jedem Gießlauf unmittelbar hinter dem Einlaufquerschnitt über einen Filter. Die Wirkung von Filtern auf die Strömungsvorgänge wird in [133] veranschaulicht beschrieben. Keramische Filter werden in Gießsystemen in erster Linie für die Steuerung der Metallgeschwindigkeit und in zweiter Linie für die Entfernung von Verunreinigungen aus der Schmelze eingesetzt. Bei Al-Legierungen, bei denen die Mehrzahl der Einschlüsse wahrscheinlich auf Oxidfilme zurückzuführen sind, können Filter die Filme zerreißen und auftrennen und damit Fehler produzieren, welche über das gesamte Gussteil verteilt sind. Solche verteilten Einschlüsse wurden als **Ursache für Mikroporosität** nachgewiesen [131].

Das Bodengussprinzip ist durch eine relativ ruhige Formhohlraumfüllung charakterisiert. **Der Nachteil der Bodenguss-Anordnung** ist aber die Füllung des fallenden Gießlaufes, bzw. die schlechte Beherrschung der Tümpelfüllung. Dieses kann durch den Einsatz von Filtern vermieden werden, was aber die Herstellungskosten erhöht.

Ein weiterer Nachteil der Bodenguss-Anordnung, vor allem beim Gießen von Zylinderköpfen, besteht in ungelentkten Erstarrung des Metalls, bedingt dadurch, dass das „frische“ Metall während der gesamten Füllzeit der tiefsten Partie des Formhohlraumes zugeführt wird. Der Nachteil wird teilweise durch einen Überlauf (Bild 49a) gelöst, bei dem das Metall nach dem Prinzip von verbundenen Behälter die Speiserbereiche direkt aus dem Gießsystem füllt.

6.2 Seitenguss mit senkrechtem Schlitzanschnitt

Ein anderes Beispiel stellt das Bild 50 dar, wo der Zylinderkopf senkrecht stehend gegossen wird. Die Form wird von der Seite angeschnitten, direkt in den Bereich der Nockenwellenaufgabe. Die Speiser sind extrem klein, was ein sehr gutes Metallausbringen sichert. Der Zylinderkopf für 3- bis 6-zylindrige Motoren ist aber relativ lang und daher ist die gesicherte Formfüllung in den vom Einguss entfernt liegenden Bereichen kritisch. Die Kokillen erfordern spezielle sequentielle Kühlungen [134].

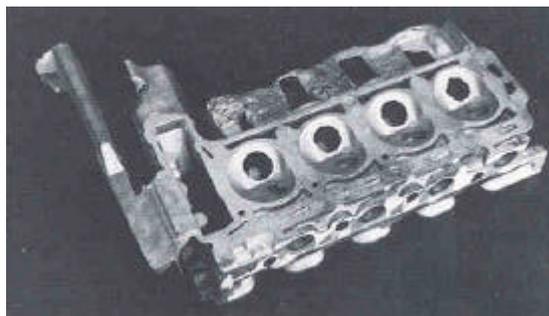


Bild 50 Von der Seite, im Kettenkasten, angeschnittenen Zylinderkopf mit Speiser [134]

6.3 Etagenanschnitt

Beim Lost-Foam-Verfahren werden zum Gießen von Zylinderköpfen zwei auf Höhe positionierte Styropormodelle mit mehreren Anschnitten an einen Gießkanal angebunden. Die Teile werden praktisch durch einen Etagenanschnitt gefüllt. Über die Höhe des Zylinderkopfes sind bis zu acht Anschnitte verteilt, Bild 51, Typ C. So werden z. B. in Deutschland die Zylinderköpfe für bestimmte BMW-Motoren gegossen. [135] beschreibt die Herstellung von Zylinderköpfen aus zwei Legierungen (Gradientenguss), welche dem Formhohlraum ebenfalls durch eine Etagenanschnitt zugeführt werden, Bild 51 Typ A-B.

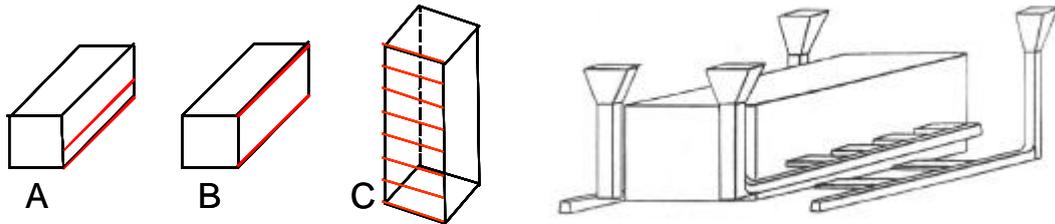


Bild 51 Drei Typen von Etagenanschnitten und Schema eines Gießsystems nach Typ A [136]

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Formfüllungsart nicht nur durch das Gießsystem bestimmt wird, sondern auch durch weitere Parameter. Ein Beispiel dafür ist in [137] enthalten (siehe auch Bild 10 der Anlage). Zur Erreichung eines wesentlich verbesserten Schwundausgleichs und damit einer verringerten Lunker- und Gießfehlerbildung beim fertigen Gussstück, wird nur so lange Gießmaterial in die Eingießöffnung der Gießform mit Etagenanschnitt eingefüllt, bis das Gießmaterial beginnt, in den Speiser auszutreten. Im Anschluss hieran wird dann frisches Gießmaterial unmittelbar in den Speiser eingegossen.

6.4 Kopfguss

Wenn der Formhohlraum von oben gefüllt wird, spricht man von dem Kopfguss. Das wichtigste Kennzeichen einer solchen Anordnung des Gießsystems ist die Positionierung des Querlaufes unter dem gleichen Niveau wie der Gießtümpel, d. h. der fallende Lauf verschwindet ganz. Die Anschnitte münden in die Seitenwand des Zylinderkopfes. Im Bild 52 ist schematisch der Schnitt durch einen Zylinderkopf dargestellt, wobei das Gießsystem mit dem Gießtümpel, dem horizontalen Querkanal und drei Anschnitten grün dargestellt sind.

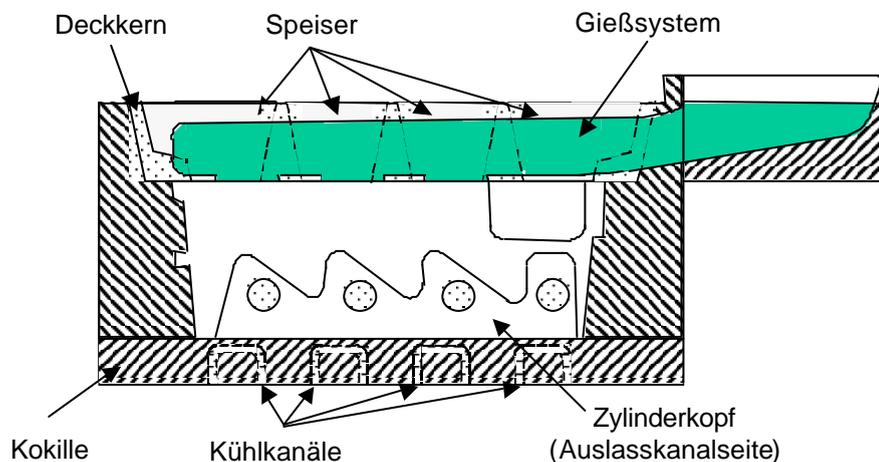


Bild 52 Schematische Darstellung der Kokille

Die Grundplatte wird mit Wasser gekühlt. Die Kokille hat zwei bewegliche Seitenteile zur Formung der Einlass- und Auslasskanalseiten und zwei Stirnzüge zur Formung der Thermostat- und Nockenwellenantriebseite (Bild 53).

Der Teil der Kokille mit dem Gießstümpel ist eine einzelne mit Schrauben befestigte Komponente. Der Gießstümpel wird durch Thermoschock sehr intensiv belastet und kann daher nach starker Beschädigung gewechselt werden. Der Hohlraum für das Gießsystem wird nicht nur durch die Kokille gebildet, sondern auch durch den Deckkern und ist selbstverständlich mit Gießschrägen zu konstruieren.

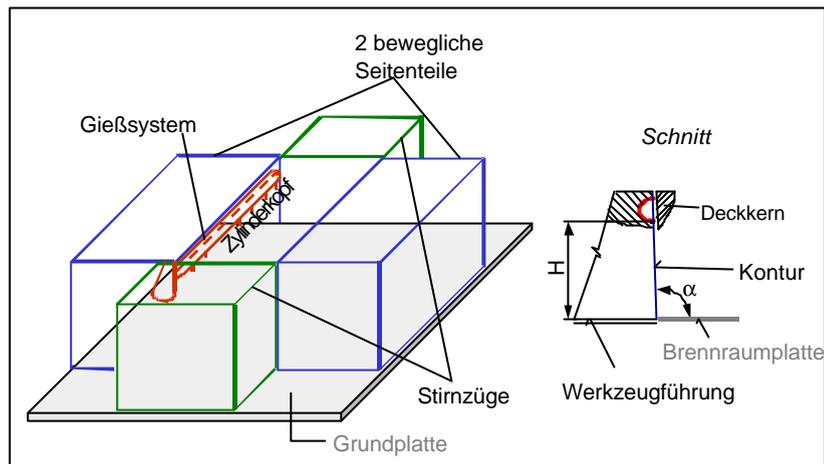


Bild 53 Räumliches Schema der Kokille mit Hauptbestandteilen

6.4.1 Einguss-Filterspeiser-Verfahren

Die Fa. Foseco hat Experimente mit einem eigenen Speisungssystem durchgeführt, Bild 54. In dem gleichen Bild ist ein so gegossener Zylinderkopf dargestellt. In die Form wird das Metall durch einen Einguss-Filterspeiser mit einem Schaumfilter im Boden gegossen. Dieser ist in einer Platte mit sechs kleinen Speiserbelägen integriert. Eine solche Variante hat eine enorm effektive Metallausbringung. Es sind keine Deckkerne notwendig. Durch die Verwendung des Isospeisebelages werden aber die Herstellungskosten erhöht.

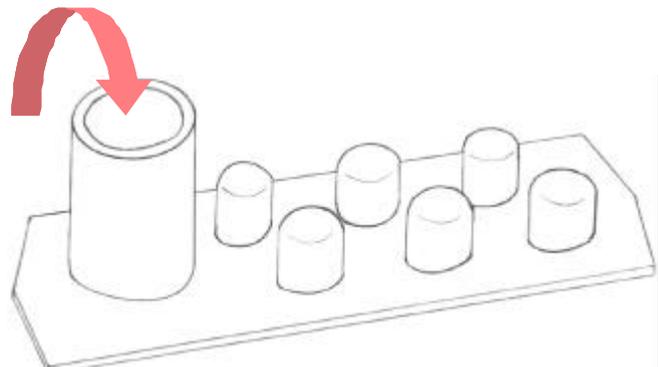


Bild 54 Zylinderkopf gegossen durch Speiser (DYPUR-Eingießverfahren) und schematisch dargestelltes Speisungssystem

Die dargestellte Variante der Zylinderkopferstellung wurde in eigenen Untersuchungen ausprobiert. Die Qualität der gegossenen Teile entsprach jedoch nicht den gestellten Anforderungen, Bild 55. Es stellte sich heraus, dass das Temperaturfeld in der Grundplatte im Auf-

treffbereich des Gießstrahles problematisch ist. Durch die Wärmekonzentration wird der Auftreffbereich zu stark erwärmt und das Gussstück wird nicht ausreichend an der Brennraumseite gekühlt. Aus diesem Grund hat Foseco noch eine andere Variante der Anordnung eines isolierenden Einguss-Filterspeisers angewendet (Bild 11 der Anlage). Die Schmelze strömt dabei nicht direkt in die Kerzenlochbereiche, sondern seitlich vorbei und teilweise über die Seitenwand in den Hohlraum.



Bild 55 Untersuchungen zur Formfüllung über Speiser

6.4.2 Geometrische Charakteristik von einzelnen Komponenten des Kopfgussgießsystems

6.4.2.1 Einguss

Das Gießereilexikon [49] definiert den Unterschied zwischen einem Trichtereinguss und einem Eingusstümpel so, dass Einguss und Ablaufstelle bei letzterem voneinander getrennt liegen. Obwohl der gewöhnliche Einguss für Kopfguss nicht die klassische Form des Gießtümpels für Eisenlegierungen aufweist, erfüllt er nicht die Hauptbedingung für einen Trichtereinguss. D. h. der Gießstrahl trifft nicht die Ablaufstelle. Demzufolge wird **der Einguss für den Kopfguss in der Praxis als Gießtümpel bezeichnet**. Eine breite Variantenvielfalt von Aufnahmeelementen für den Bodenguss wird bei [138] veranschaulicht.

Der Einguss ist durch charakteristische Abmessungen beschreibbar. Dazu zählen das Volumen, die projizierte Fläche, die Konturoberfläche und die Abmessungen entsprechend dem Bild 56. Das Volumen sollte möglichst klein sein, um einen niedrigen Anteil an Kreislaufmaterial zu erzielen. Es ist jedoch darauf zu achten, dass der Einguss wie ein Reservoir funktioniert und der Gießleistung angepasst werden muss. Es darf kein Verschütten auftreten und die Innenkontur darf nicht das Anhaften von Oxidhäuten und Metallresten unterstützen. Der Einguss kann symmetrisch oder unsymmetrisch ausgeführt werden. Die Abmessung „c“ sollte möglichst minimal sein, um den Gießlöffel nahe und damit auch tief setzen zu können. Das beeinflusst die Fallhöhe des Metalls günstig. Der Gießstrahl ändert seinen Auftreffbereich am Boden des Eingusses während des Gießens. Dies beeinflusst die Gießleistung und die Anstellung des Gießlöffels zum Einguss. Der Boden des Eingusses bildet eine bestimmte Kurve. Zur optimalen Leitung des Metalls ist eine Zykloide günstig.

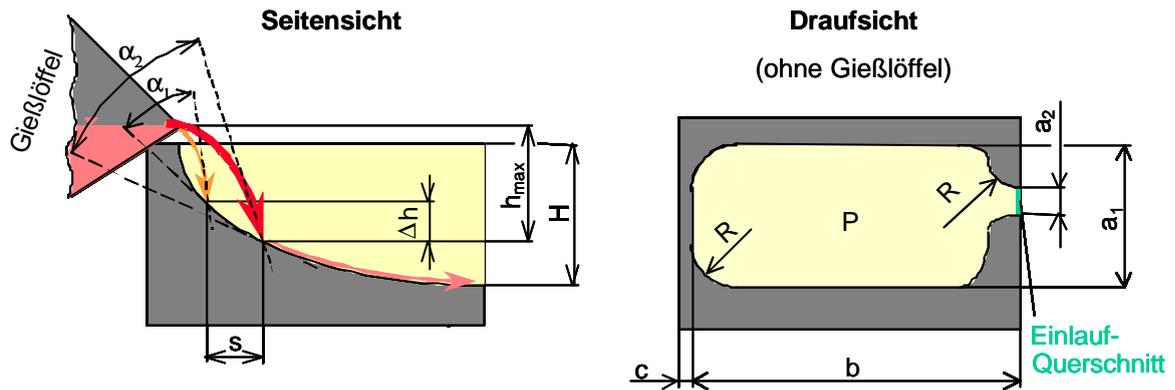


Bild 56 Charakteristische Abmessungen des Gießtumpels für Kopfguss und Darstellung des Gießstrahles beim Gießen

Im Bild 57 sind verschiedene Beispiele von Gießtumpeln für Kopfguss aus der Praxis dargestellt. Die Variantenvielfalt ist nicht nur bezogen auf das Tümpelvolumen sehr vielfältig. Auch die projizierte Fläche, die Höhe „H“ oder die Symmetrie sind sehr unterschiedlich.

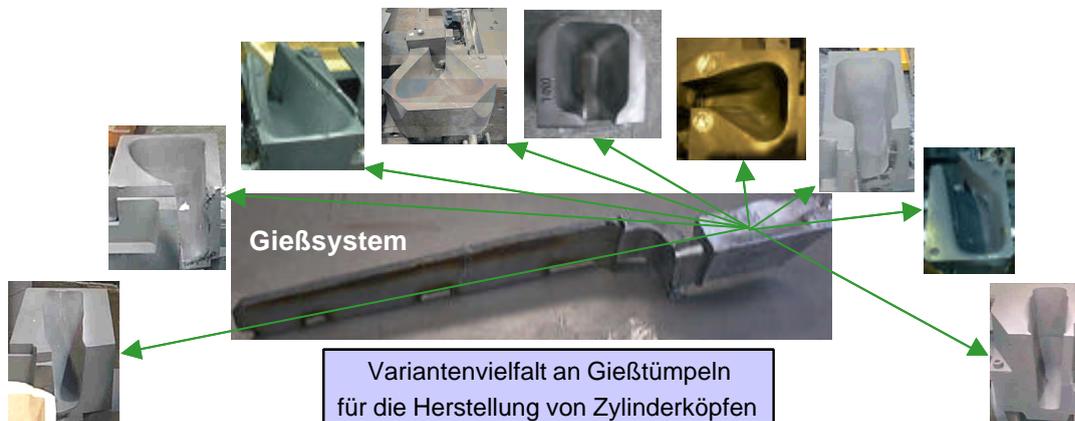


Bild 57 Gießtümpel des Kopfgussgießsystems an Kokillen für Zylinderköpfe

6.4.2.2 Querlauf

Der Querlauf hat die Aufgabe, das Metall zu den Anschnitten zu führen. Die Anschnitte sollen möglichst gleichzeitig und mit gleicher Intensität gefüllt werden. Die Füllung des Querlaufes soll in keinem Fall die Qualität der Schmelze verschlechtern. Der Gießlauf muss auch genügend entlüftet werden. Der horizontale Querlauf für das Gießen von Aluminium beim Bodenguss hat eine Mündung mit kleinerem Querschnitt. Eine solche Bedingung ist beim Kopfguss nicht realisierbar, weil dann der Formhohlraum nur über die ersten Anschnitte in der Reihe gefüllt wurde. Daher ist eine andere Konizität des Laufes erforderlich. Der Einlaufquerschnitt ist größer zu konstruieren. Das bringt jedoch Probleme bei der Gießsystemfüllung mit sich. Die Anschnittfüllung verläuft zwar wesentlich besser, aber der Einlaufquerschnitt bleibt zu lange gefüllt.

In die Querlaufmündung werden in der Praxis oft Metallsiebchen eingelegt, um die kompakten Oxidhäute zu zerreißen. Damit wird gewährleistet, dass Oxidhäute aus Transportsystemen keine undichte Stelle im Gussteil verursachen. Das Siebchen bildet auch einen hydrodynamischen Widerstand, was eine schnellere Tümpelfüllung unterstützt.

6.4.2.3 Anschnitt

Das Bild 58 zeigt unterschiedliche Varianten der Anschnittanordnung zum Gussteil und unterschiedliche Querschnitte. In der Praxis sind meistens 2 bis 5 Anschnitte über die ganze Länge des Zylinderkopfes angeordnet. Der Zylinderkopf für Rotacast wird neben den Speisern bei höherem Kippgrad durch einen langen Anschnitt gefüllt.

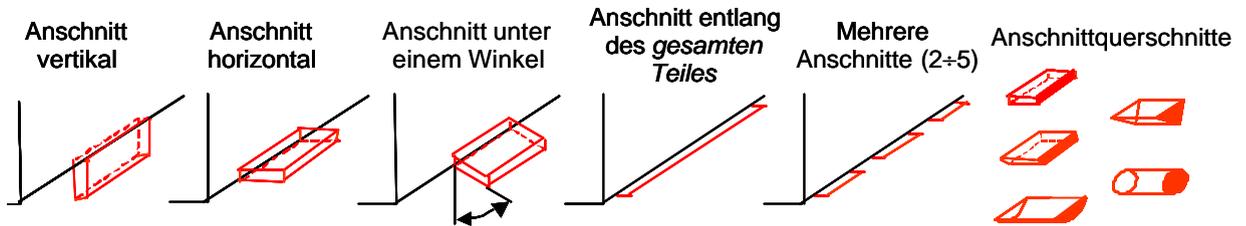


Bild 58 Anordnung und Ausführung eines Anschnittes

Der Untersuchung der Wirkung von unterschiedlichen Gießsystemen (Anschnittgestaltung) auf den Füllungscharakter der Al-Schmelze von plattenförmigen Gussstücken haben sich Autoren in [139] gewidmet.

In der Arbeit wurden nur die Gießsysteme mit vertikal angeordneten Anschnitten untersucht. Um die Strömungsgeschwindigkeit der aus Anschnitten strömende Schmelze zu reduzieren, wird empfohlen, die Anschnitte horizontal anzuordnen, oder entsprechend dem Bild 59B ausführen. Dadurch wird der hydrodynamische Widerstand erhöht. Man kann erwarten, dass bei dieser Ausführung das Gießsystem schneller gefüllt wird, d. h. das Schluckvermögen des Gießsystems durch hydrodynamische Verluste wird verringert.

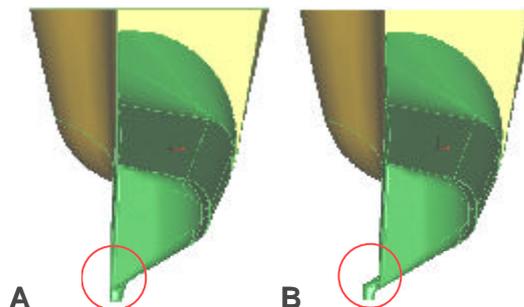


Bild 59 Konventionelles Gießsystem und Variante mit geknickten Anschnitten

6.5 Bewertung von Kopfguss und Bodenguss

Das Gießsystem sichert den Transport der Schmelze in den Formhohlraum mit minimalen Qualitätseinbußen. In der Fachliteratur werden die Reynoldszahl oder die maximale Strömungsgeschwindigkeit für Al-Legierungen direkt vorgeschrieben. Es wurden die Wege zur Sicherung einer ruhigeren Formhohlraumfüllung gezeigt. Die Oxidhaut spielt bei der Strömungsdynamik von Al-Legierungen eine sehr wichtige Rolle. Anhand von Experimenten muss deren Einfluss auf die Qualitätsbeeinflussung verifiziert werden.

Neben der Wahl des Gießverfahrens ist es genau so bedeutsam und auch schwierig, ein optimales Gießsystem festzulegen. Die möglichen Varianten der Zylinderkopforientierung in der Form und die Gießsystemvarianten wurden aufgezeigt. Da die höchsten mechanischen Beanspruchungen an Zylinderköpfen im Brennraumbereich auftreten, hat die Orientierung

des Brennraumbereiches im unteren Teil der Form eindeutige Priorität. Dabei wird die Brennraumplatte intensiv mit Wasser gekühlt. Die Intensität der Kühlung der Brennraumplatte ist ein wichtiger technologischer Parameter, der nähere Untersuchungen erfordert. Mit dem Wasserraumkern werden auch die Kanäle für die Verbindung des Kühlbereiches im Zylinderkopf und im Zylinderblock ausgeformt. Die Kerngase kondensieren aber bei sehr intensiver Kühlung schneller und intensiver. Solch ein wachsendes Kondensat an der Kernmarkenkontur kann die Lage des Wasserraumkernes verändern und damit die Maßgenauigkeit negativ beeinflussen. Die Beseitigung dieses Kondensats ist unbedingt notwendig. I.d.R. geschieht dies mit Druckluft beschleunigtem Abrasivum, z.B. „Glasperlen“. Die wärmere Schmelze verbrennt teilweise das Kondensat. Daher wird in der Tabelle 5 der Anlage der Bodenguss günstiger bewertet. Die hohe Schmelztemperatur sichert aber nicht den gewünschten DAS.

Heutzutage haben sich beim Schwerkraftkokillenguss hauptsächlich zwei Gießsysteme, Bodenguss und Kopfguss, durchgesetzt. Für den Kopfguss sprechen die gelenkte Erstarrung, kürzere Fließwege im Gießsystem, das Gießen einer kälteren Schmelze einschließlich der Möglichkeit bei einer solchen Gießtemperatur die Grundplatte intensiver zu kühlen, die einfachere Ausführung von Werkzeugen und das günstigere Ausbringen. Der Bodenguss dagegen liefert eine besser kontrollierbare Formhohlraumfüllung, was beim Kopfguss kritisch ist. Die Vorteile und Nachteile beider Gießsysteme unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bewertungskriterien sind in den Tabellen 3, 4 und 5 der Anlage dargestellt. Aus allen Vergleichen und Bewertungen geht hervor, dass der einzige große Nachteil des Kopfgusses gegenüber dem Bodenguss die Art der Füllung des Formhohlraumes ist. Diese Schwachstelle ist durch Optimierungsarbeiten wesentlich zu verbessern.

7 Formfüllung

Beim Kopfguss ist der Strömung die größte Aufmerksamkeit zu widmen. Im Gegensatz dazu liegen detaillierte Untersuchungen der Gießsystemfüllung für Bodenguss in der Fachliteratur vor. Die Veröffentlichung von Sirell und Campbell [140] ist ein repräsentatives Beispiel dafür. Kopfguss zum Gießen von hochbelasteten, relativ kleinen Teilen ist allerdings, was grundlegende Untersuchungen anbelangt, ein ganz neues Gebiet.

Bei der Gießsystemfüllung (Kopfguss) treten folgende negative Auswirkungen auf:

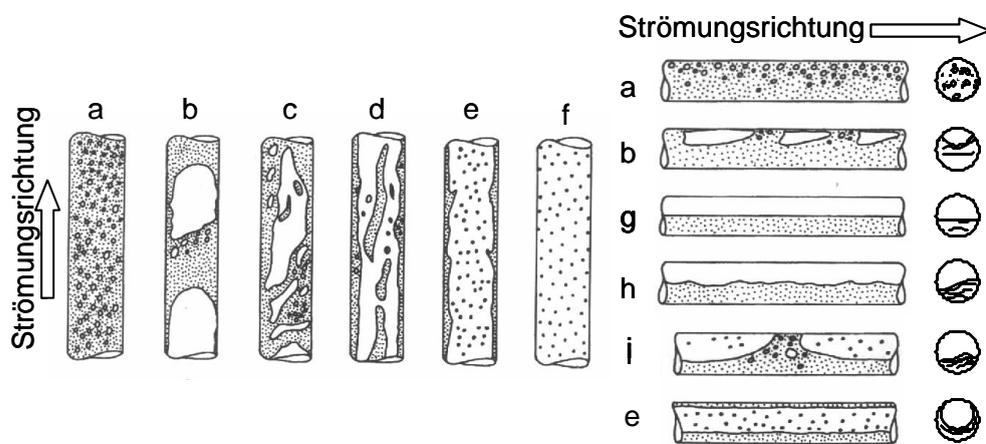
- die Anschnitte werden sehr früh und sehr dynamisch gefüllt (druckbeaufschlagtes System),
- es handelt sich um eine mehrphasige Strömung,
- der Formhohlraum wird unkontrollierbar gefüllt.

Das Bild 60 zeigt die verschiedenen Arten von zweiphasigen Strömungen. Beim Gießen von Al-Legierungen tritt noch eine feste Phase auf, die durch die Oxidhaut gebildet wird. Im günstigsten Fall ist sie nur an der Oberfläche während der Strömung vorhanden und wird durch die Dendritenbildung der erstarrenden Schmelze in dünnen Kanälen/Wänden mit hohem Wärmeabfuhr gebildet. Eine Strömung mit Lufteinschlüssen ist meist am Anfang des Gießens bei gießtechnologisch schlecht ausgelegten Gießsystemen oder bei hoher Gießstrahlhöhe aus dem Gießlöffel, während die Kanäle noch nicht voll gefüllt sind, zu beobachten. **Der Anfang des Gießens ist daher der kritischste Abschnitt der Formfüllung.** Bei einem nicht vollständig gefüllten Einlauf besteht die Gefahr des Mitreißens von Luft. Daher ist es

erstrebenswert den Einlauf so zu füllen, dass der Querschnitt in der Zeit nahe Null voll wird. Dies wird durch die, sich durchschmelzenden, eingelegten Plättchen in Tümpelboden [115] oder im Lauf [141] realisiert, da diese das Metall erst nach einer definierten Schmelzzeit und damit Fallhöhe in die Form fließen lässt.

Bei der Technologieoptimierung sind folgende Aufgaben zu lösen, und zwar Festlegung:

- des Querschnittsverhältnisses (Einlauf/Auslauf),
- der Geometrie des Gießtumpels,
- der Geometrie des Laufes,
- der Anzahl und Geometrie von Anschnitten, Anordnung am Gussstück,
- der Temperatur des Gießsystems,
- der Entlüftung des Gießsystems und Formhohlraumes und
- der Kokillenschichte.



a Blasenströmung (bubble flow)

b Pfropfenströmung (plug flow)

c Schaumströmung (churn flow)

d Strahlen-Ring-Strömung (wispy-annular flow)

e Ringströmung (annular flow)

f Sprühströmung (spray or drop fl.)

g Schichtenströmung (stratified flow)

h Wellenströmung (wavy flow)

i Schwallströmung (slug flow)

Bild 60 Strömungsformen im senkrechten und waagerechten Rohr [117] Das Gießsystem sollte minimale Wärmeverluste verursachen. Dieses ist wiederum schwierig zu erreichen, weil die Kontur des Gießsystems zur Gewährleistung einer einfachen und problemlosen Gussstückentnahme mit Graphitschichte präpariert sein muss. Beim Kopfguss ist der Abstand von der gekühlten Grundplatte jedoch groß genug, um die Temperaturverhältnisse in den gewünschten Grenzen zu halten.

Im Bild 61 sind zwei Beispiele eines Kopfgussgießsystems dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch die vertikal angeordneten Anschnitte die vorderste, dosierte Schmelze direkt auf die gekühlte Grundplatte strömt und dort erstarrt. Der in der Kokille unten liegende Bereich soll die besten mechanischen Eigenschaften aufweisen, daher sind solche Effekte unerwünscht. Aufgrund der gegenläufigen Richtung von Schmelze und der abgehenden Gase und Luft besteht das Risiko, dass diese Gase von der Schmelze mitgerissen oder eingeschlossen werden. Scharfe Kanten an der Kontur des Gießsystems sollten ebenfalls vermieden werden, daher ist der Typ A strömungstechnisch ungünstig ausgelegt.

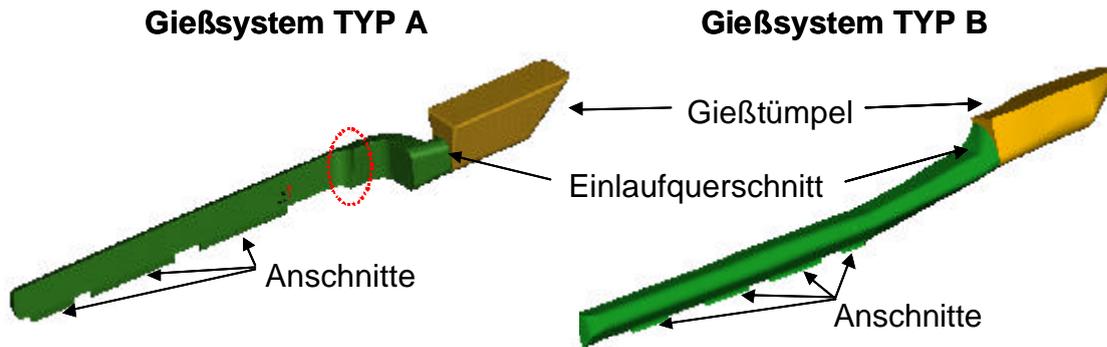


Bild 61 Geometrie von zwei Gießsystemen zum Gießen von Zylinderköpfen

Das Verhältnis SA_A / A_E bewegt sich in der Praxis von 1/1,6 bis zu 1/4,6, d. h. der Einlaufquerschnitt ist immer größer als die Summe der Anschnittquerschnitte. Nach den gießtechnologischen Regeln (Kapitel 6) ist beim Bodenguss das Verhältnis gerade umgekehrt. Damit ist ein weit vom Einlaufquerschnitt vergrößerter Laufquerschnitt verbunden. Diese Regel ist beim Kopfguss nicht realisierbar, weil dann der Formhohlraum nur durch die ersten Anschnitte gefüllt wird. Hieraus entsteht der Nachteil, dass der Gießstümpel bzw. das Gießsystem länger gefüllt werden muss.

Unter der Zielstellung die Formfüllung beim Kopfguss möglichst ruhig zu realisieren, ist es notwendig, die Struktur der Seitenwände gründlich zu studieren. Die Lage des Gussstückes und des Gießsystems in der Kokille sind im Bild 53 dargestellt. Je größer der Winkel α (Winkel zwischen der Konturwand unter den Anschnitten und der Grundplatte) und je kleiner die Fallhöhe H ist, desto besser sind die Strömungsbedingungen im Formhohlraum. In [120] wird die Formfüllung durch einen an der Wand entlang strömenden Strahl beschrieben (Bild 62). Am Boden wird die Strömungsgeschwindigkeit wie folgt berechnet:

$$v_2 = v_0 \cos g \sin g . \quad (9)$$

Die Wucht des Aufschlags und folglich die Stärke des Wirbels sind gleich dem Anwachsen der kinetischen Kräfte. Bei einem Winkel von $\gamma = 90^\circ$, d. h. bei senkrechter Wand, ebenso wie bei $\gamma = 0^\circ$, d. h. bei waagerechten Fläche erreichen die kinetischen Kräfte den maximalen Wert. Der geringste Wert ergibt sich bei einem Neigungswinkel der Fläche von $\gamma = 45^\circ$.

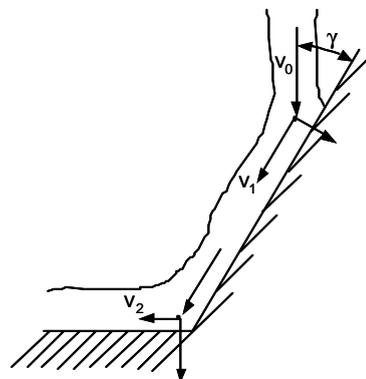


Bild 62 Bewegung der Flüssigkeit entlang einer geneigten Wand [120]

Die Formfüllung ist beim Kopfguss immer von der Kontur der Bauteile und den daraus resultierenden Störungen im Strömungsweg abhängig. Zerklüftete Konturen und Hinterschneidungen können zu einer erheblichen Beeinflussung der Formfüllung führen. Aus diesem

Grund ist das Kippgießen vorteilhaft, bei dem die Form zum Gießbeginn zur Eingussseite hin so weit geneigt wird, dass eine möglichst geringe metallostatische Gießhöhe erreicht wird. Durch das Kippen zur Eingussseite hin stellt sich eine geringere Einströmgeschwindigkeit im Anschnitt ein, die zur Verminderung von Schaumbildung beiträgt.

Am Beispiel des Zylinderkopfes (Bild 63a und b) ist eine solche Entscheidung sehr einfach. Die linke Seite ist gestaltungsbedingt sehr günstig schräg zur Brennraumseite hin geneigt, das Metall wird demzufolge über die Kontur der Kokille auf dieser Seite ruhig ein- und weitergeleitet. Die rechte Seite ist senkrecht zur Brennraumseite angeordnet, d. h. es könnte ein freier Fall der Schmelze beim Füllen des Formhohlraumes zu verzeichnen sein. Aber auch die linke Seite gestattet keine störungsfreie Füllung des Brennraumes. Das Bild 7.4b zeigt einen Schnitt auf einem Niveau, wo schon ein freier Fall absehbar ist und die Wand unter einem anderen Winkel zur Grundplatte angeordnet ist.

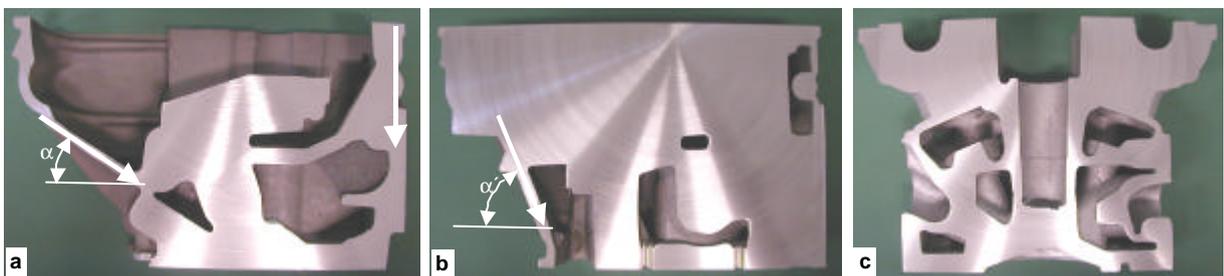


Bild 63 Beispiele geschnittener Zylinderköpfe

Es existieren auch Teile, wo diese Entscheidung schwieriger ist (Bild 63c) und wo es aus Gründen der Ausschussminimierung erforderlich ist, konstruktive Änderungen vorzunehmen. Ein solches Beispiel geht aus dem Bild 64 hervor. Die markierte Partie wurde konstruktiv neu gestaltet.



Bild 64 Zylinderkopf mit Gießsystem und Speisern

Im Bild 65 ist eines der schwierigsten Probleme bei der Formfüllung durch Kopfguss dargestellt. Die schräg nach unten fließende Flüssigkeitsfront trifft auf störende Konturen, die zur Aufspaltung des Stromes und damit zur größeren Oxidation führen können. Weiterhin hat die Veränderung der Druckenergie im Gießlauf eine direkte Wirkung auf die Wanderung des Schmelzestromes während des Gießens. Dieses kann auch eine zu schnell zugeführte Schmelze verursachen. Es kann passieren, dass durch die Wanderung des Schmelzestromes der Bereich (durch die beiden Pfeile markiert) hinter dem Kern nicht kontinuierlich gefüllt wird und somit der Füllvorgang unterbrochen bleibt, was zum Oxidieren der Schmelze bzw. zu einem Kaltlauf und damit zu einer undichten Stelle führen kann. Aus diesem Grund ist es

notwendig, die Anschnitte günstig über der Länge des Laufs zu positionieren und die Wanderung des Schmelzestromes zu minimieren. Eine weitere Minimierung der Fehlstellen kann durch den Schutz vor Oxidation mit einem Inertgas erreicht werden.

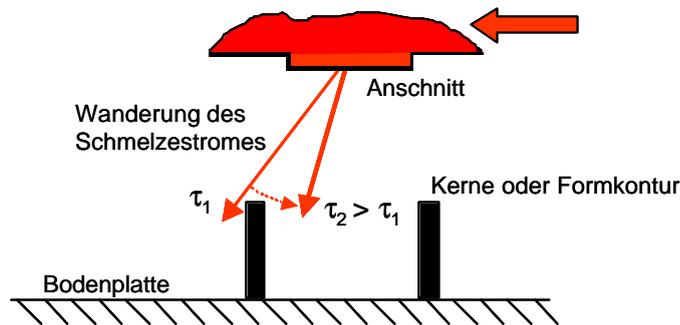


Bild 65 Schematische Darstellung der möglichen Formfüllungsunterbrechung

Der im Bild 65 dargestellte Effekt wird durch eine in horizontaler Richtung zu schnell zugeführte Schmelze verursacht. Neben der Lösung, einen keramischen Schaumfilter direkt in den Gießstrahl zu positionieren (Bild 47c) oder durch horizontal angeordnete Anschnitte (Bild 59) die dynamisch strömende Schmelze zu beruhigen, den Gießtümpel möglichst schnell zu füllen und vollzuhalten, bieten sich weitere Möglichkeiten, so z. B. die Einlage eines Schaumfilters direkt hinter dem Gießtümpel, am besten in der Laufmündung (Bild 66a). Um die Tümpelfüllung besser zu beherrschen, wird vorgeschlagen ihn nicht parallel zum Gießlauf anzuordnen, sondern senkrecht. Der Einlaufquerschnitt befindet sich damit nicht am Boden der Tümpelseitenwand, sondern im Bodenbereich des Tümpels. Den gleichen Zweck erfüllt die Variante im Bild 66b. Es handelt sich praktisch um ein im oberen Bereich des Formhohlraumes angeschnittenes Bodengussgießsystem.

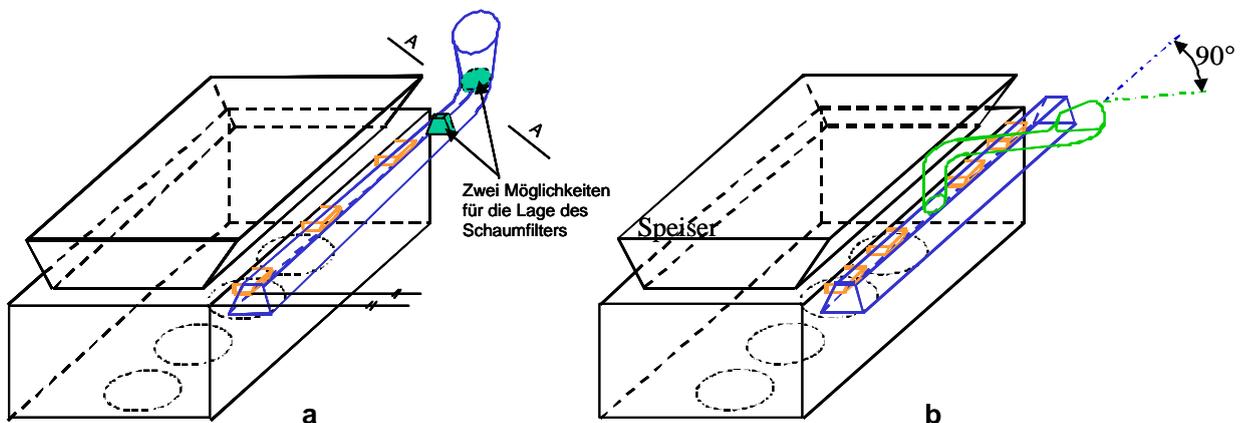


Bild 66 Positionierung eines Schaumfilters im Kopfgussgießsystem (a) und andere Ausführung des Gießsystems (b)

Grundlegende Untersuchungen zeigen, dass bei Strömungsgeschwindigkeiten von über $0,5 \text{ m s}^{-1}$ die Schmelzefront aufreißt [119], d. h. schon eine Fallhöhe von 13 mm verursacht eine zu hohe Geschwindigkeit. Das Aufreißen der Schmelzefront führt zur erneuten Oxidation und zur Einschwemmung der Oxidhäute in die Schmelze. Hierbei ist nicht nur die Strömungsgeschwindigkeit im eigentlichen Formhohlraum, sondern auch die im Laufsystem wichtig und von größerem Einfluss als die im Anschnitt selbst.

Die Kokillenschlichte hat deutliche Auswirkungen auf das Fließverhalten der Schmelze [142]. Ihre Aufgabe besteht darin die Oxidschicht der einfließenden Gusslegierung zu fixieren, so dass sich diese nur an der vorderen Front neu bilden muss. Zu diesem Zweck beinhaltet die Schlichte oxidfixierende Inhaltstoffe (mikroskopisch kleine scharfkantige Partikel). Bedingt dadurch sind auch die Mengen an Oxideinschlüssen in der Struktur des Gussteiles geringer. Diese Problematik war aber nicht Gegenstand der hier beschriebenen Optimierungsarbeiten.

7.1 Visualisierung der Strömung

Zur Optimierung der Formfüllung reicht es nicht aus, nur den Durchfluss, die Widerstandszahlen und die Querschnitte von Gießsystemelementen, aus Berechnungen oder Modellierungen der Gießsysteme zu kennen. Des Weiteren ist ein Studium der räumlichen und zeitlichen Geschwindigkeitsfelder der Formhohlraumfüllung bis zum Anfang der Kristallisation eine der wichtigsten Aufgaben bei diesen Betrachtungen. Für die Bestimmung des Bewegungscharakters von Flüssigkeiten in einer Form ist demzufolge eine Strömungsvisualisierung notwendig.

Campbell schreibt in seinem Buch [143]: „Die in ein Laufsistem hinabstürzende und sich überschlagende Schmelze erzeugt Wolken von Luftblasen und Meere von Oxidfilmen“. Das Ziel der Optimierungsarbeiten ist es, diese Effekte zu vermeiden. Zur Beobachtung von Strömungsvorgängen und zur Bestätigung der Beschreibung von Campbell sind mehrere Werkzeuge ansetzbar:

1. Video-Aufnahmen durch eine Glasscheibe,
2. Einsatz von Kontaktelektroden,
3. Einsatz der Radioskopie,
4. Einsatz der Thermographie.

Es wurde die erste Methode gewählt, weil diese eine reale Beobachtung des Gießsystems in der Kokille ermöglicht und weil sie technisch nicht so aufwendig ist wie die anderen Methoden.

Eine Sichtbarmachung des Strömungsverhaltens ist nach [116] auf folgenden Wegen möglich:

- durch Blasen, Rauch (Gas) oder Farbstoffe (Flüssigkeiten),
- mit Hilfe von anisotropen, reflektierenden Teilchen,
- mit Hilfe von photochromen Verbindungen.

Man unterscheidet zwischen Stromlinien, Bahnlinien und Streichlinien [117].

In den realen – nicht durchsichtigen – Gießformen wurden Anordnungen elektrischer Kontakte in unterschiedlichen Variationen zur Verfolgung der Fließfront eingesetzt, die jedoch keine kontinuierliche Erfassung der Fließfrontposition gestatten [144,145]. In [146] wird eine Methode vorgestellt, die sowohl die thermischen Vorgänge als auch die Dynamik des Fließvorganges erfasst. Das Messverfahren basiert darauf, dass ein Sensor mit der Strömungsfront mitbewegt wird.

Die Strömungsuntersuchungen mit einer Glasscheibe an einer realen Kokille und flüssigem Metall sind ein Hilfsmittel, das in der Fachliteratur für die Lösung von unterschiedlichen Problemen relativ oft erwähnt wird. Z. B. in [147] ist der gesamte horizontale Lauf des Bodengussgießsystems mit einer Glasscheibe abgedeckt und mit einer Videokamera (50 Bil-

der/sec.) wurde die Strömung aufgenommen. Weitere Beispiele, bei nur teilweise aus Glas gefertigter Form, zeigen [148,149]. Die Strömung wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera mit 1000 Bilder/sec aufgenommen.

Den Wert $0,5 \text{ ms}^{-1}$ für die Strömungsgeschwindigkeiten hat [119] nur mit Hilfe von Videoaufnahmen von realen Fließvorgänge gewonnen. Pyrex-Glasfenster und die Kontaktelektroden wurden von [150] bei der Schmelzeströmung von Stahlguss für die Optimierung der Gießtechnologie von Radkörpern eingesetzt. Obwohl das die kompliziertere und aufwendigere Methode ist, erwies sie sich als die beste Methode. [151-159] beschreiben Radioskopie (auch dynamische Radiographie) als Methode zur Beobachtung der Formhohlraumfüllung. Die Methode hat den Vorteil, dass auch die Erstarrungsvorgänge nach dem Füllen zu beobachten sind. Dabei erwies sich auch die Thermographie [151], die neben der Füllungsvorgänge auch den Wärmehaushalt der Form betrachtet, als hilfreich.

7.2 Modellierung mit Wasser als Modellflüssigkeit

Rabinowitsch hat in seinen Arbeiten in den 70er Jahren für die Definition der Wirkung von Anschnittsystemen auf den Charakter der Strömung erfolgreich Versuche mit Wasser als Modellflüssigkeit benutzt [114]. Die Versuchsanlage wurde aus transparentem Kunststoff gebaut und die Strömungsgeschwindigkeit, die Wirbel, die Gießzeit, die Gießleistung aus einzelnen Anschnitten usw. wurden beobachtet. Als Ergebnis wurde eine Reihe von Gießsystemvarianten veröffentlicht.

Das Wassermodell und die Zeitlupe wurden bei der Modellierung des Formfüllungsvorgangs bei einer ganzen Palette von Veröffentlichungen eingesetzt [152,160]. In [161] haben Eigenfeld und Järke zur Optimierung des Einströmvorganges beim mp-Verfahren das Plexiglasmodell eines Kurbelgehäuses gefertigt und zur Kenntlichmachung von Stromlinien¹ das Wasser mit feinem Aluminiumpulver oder Kunststoffgranulat versetzt. Ebenfalls hat [150] Plastikteilchen in das gefärbte Wasser gemischt, um die Strömungsbewegungen deutlich erkennbar zu machen. In die Form war ein Plastikfenster für die Kamera eingebaut. Die Bildung von Oberflächenwellen oder sogar die Erzeugung einer Fontäne wurde untersucht. Es sind wertvolle Informationen über den Strömungsverlauf oder über Bereiche, wo sich Wirbel und Spritzer bilden (zeigt eine Neigung zu Strömungseinschlüssen) gewonnen worden.

Rautenbach hat in seiner Arbeit [162] eine Originalzylinderkopfkokille aus transparentem Kunststoff benutzt. Auch die einzulegenden verlorenen Kerne wurden aus Kunstharz hergestellt. Die Kokille war modular aufgebaut, d. h. für die Erprobung verschiedener Gieß- und Anschnittsysteme mussten nur die jeweiligen Module, in die die Gießläufe und Anschnitte eingearbeitet sind, neu hergestellt werden. Die Abdichtung des Modells wurde mit einer dünnen Silikonschnur realisiert. Die Kokille wurde mit einer Versuchsdosiereinrichtung ergänzt um eine wiederholbare Abbildung des realen Dosiervorganges sicher zu stellen, Bild 67.

¹ Die **Stromlinien** sind die Linien des Vektorfeldes $\mathbf{v}(r,t)$; sie sind zu einem gegebenen Zeitpunkt dadurch definiert, dass ihre Tangenten an jeden Punkt mit dem Geschwindigkeitsvektor $\mathbf{v}(x,y,z,t_0)$ übereinstimmen.

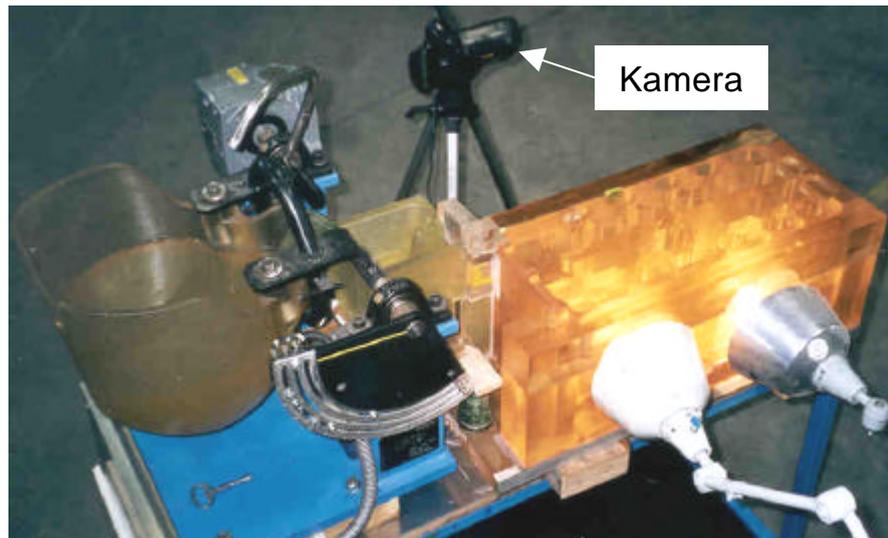


Bild 67 Versuchsdosiereinrichtung mit der „gläsernen“ Kokille

Mit einem Getriebemotor wird ein aus transparentem Kunstharz gefertigter Gießlöffel angetrieben. Über eine speicherprogrammierbare Steuerung lässt sich die Motordrehzahl (Hz-Einstellwerte) und damit die Auskippgeschwindigkeit regeln. Über die in Gradschritten unterteilte Kurvenscheibe lässt sich mit acht Schaltnocken mittels Schaltimpulsen die Steuerung des Motors regeln.

Die Versuche zeigten an zwei Beispielen den großen Unterschied der Wasserströmung und der Strömung von Aluminium:

1. Das flüssige Aluminium bildet einen kompakten Gießstrahl. Der Wasserstrahl tropft nach dem Verlassen der Gießschnauze und umströmt die Außenwand des Löffels, Bild 68.
2. Das Verhalten der Schmelze im Gießlauf, beobachtet durch den Überlauf (verbindet Gießsystem direkt mit dem Speiser), ist während der Formhohlraumfüllung ganz ruhig. Es bildet sich eine Oxidhaut, die praktisch die ganze Zeit bis zur aktiven Benutzung des Überlaufs stabil bleibt. Im Wassermodell strömt das Wasser sofort aus dem Überlauf heraus, begleitet durch starke Wirbel und einen Fontäneeffekt.

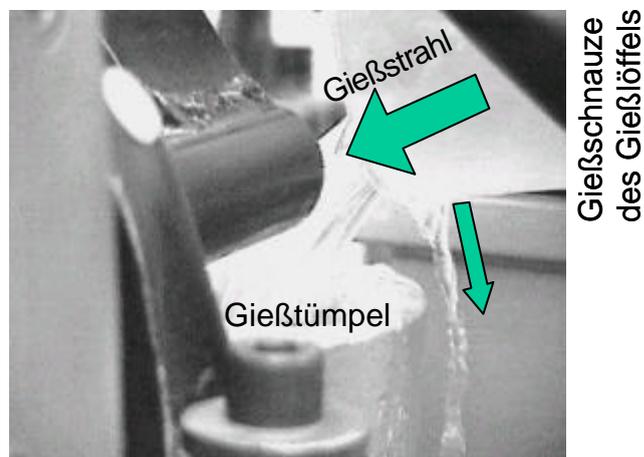


Bild 68 Effekt der Strömungsteilung beim Abguss mit Wasser

Obwohl Wasser bei ca. 63°C eine identische kinematische Viskosität wie flüssiges Aluminium besitzt und damit auch die Reynoldszahl identisch ist, entstehen bei der Strömung deutliche Unterschiede. Es gibt keinen Grund die Kongruenz in der „inneren“ Turbulenz abzustreifen. Die Oberflächenturbulenz und der Verlauf der Formfüllungsfront sind jedoch von zwei weiteren Faktoren abhängig, von der Oberflächenspannung und der Oxidhautfestigkeit. So ist die Oberflächenspannung von Aluminium mit Oxidfilm 12mal größer als die des Wassers [121]. Des Weiteren hat die auf dem Aluminium bestehende Oxidhaut eine eigene Festigkeit, welche den Strömungscharakter der inneren Turbulenz, siehe Kap. 5, beeinflusst.

Zusammenfassend können folgende Aussagen getroffen werden:

1. Die turbulente Strömung von Aluminium mit der Oxidhaut an der Oberfläche stellt eine mehrphasige Strömung dar. Es ist eine kritische Strömungsgeschwindigkeit abgeleitet worden. Neben der Forderung nach vollen Kanälen während der Formfüllung wurde eine Reihe von Problembereichen formuliert.
2. Die Formfüllung ist für den Kopfguss von höchster Bedeutung. Beim Kopfguss ist man bestrebt, das Metall so zu leiten, dass es an der geeigneten Wand nach unten fließt. Das Kopfguss-Anschnittsystem ist nicht für jeden Zylinderkopf geeignet. Es sind große Verwirbelungen vermeidbar. Es wurde das Prinzip der Formfüllungsunterbrechung dargestellt, welches zu einem undichten Teil führen kann. Die Wege zur Vermeidung der Wanderung des Gießstrahls im Formhohlraum sind entweder der Abbau der kinetischen Energie im Gießsystem, z. B. durch den Einsatz von Filter oder die Anordnung von Anschnitten.
3. Die Strömungsvisualisierung ist ein zweckmäßiges Werkzeug zur Gewinnung von Erkenntnissen für diese Prozesse. Als Untersuchungsmethoden werden Videoaufnahmen an realen Kokillen und am Wassermodell empfohlen. Mit dem Einsatz von hitzbeständigen Glasscheiben ist es beim Kopfguss möglich die Strömungsvorgänge in den Gießkanälen ohne großen Aufwand zu beobachten. Das Wassermodell ist ein **qualitatives** Werkzeug zur Beobachtung der Strömungsvorgänge beim Gießen von Al-Legierungen. Es hilft das Verständnis dafür zu schaffen, welche Elemente welche Wirkung auf die Strömung ausüben und in welcher Beziehung Querschnittverhältnisse und Gießbedingungen zueinander stehen. Es ist notwendig, diese Elemente und Parameter zu variieren, um auf der Basis von Vergleichen zu einem aussagekräftigen Ergebnis zu gelangen.

8 Berechnung von Gießsystemen

Beim Entwurf von Gießsystemen zur Herstellung von Gussteilen steht, nach der Festlegung der Gussstücklage in der Form, die Gießzeit im Vordergrund. Die Gießzeit (Formfüllzeit) wird vom Gussstückgewicht, der minimalen Wanddicke oder vom Modul des Gussstückes beeinflusst. Weiterhin beeinflussen der Drosselquerschnitt oder die Anschnittdicke die Formfüllzeit. Zu diesem Zweck sind aus der Fachliteratur eine Vielzahl von Diagrammen zu nutzen, die aus Experimenten an bestimmten Gussstückgruppen, für unterschiedliche Gusslegierungen, gewonnen wurden [113,125-128]. Diese Arbeiten beinhalten umfangreiche Beispiele von Gießsystemelementen zur Herstellung von unterschiedlichen Gussstücken und geben auch Empfehlungen für die Gießtemperatur und schätzen den Temperaturverlust ab. Vorschläge für das Speisungssystem knüpfen hier direkt an.

Zur Berechnung des Gießsystems werden die bekannten Strömungsgesetze von flüssigen Metallen angewendet: Kontinuitätsgleichung, Torricellische Gleichung, Bernoullische Gleichung, und Hagen-Poiseuillesches Gesetz. Die Beziehung des Hagen-Poiseuillesches Gesetzes ist nur für die laminare Strömung gültig. Das Gesetz von Bernoulli drückt die Energieerhaltung für inkompressible, ideale Fluide aus. Neben anderen Einschränkungen gilt die Gleichung nur für voll gefüllte Kanäle und die errechneten Werte verkörpern nur Mittelwerte für den ganzen Querschnitt.

Mit den steigenden Anforderungen an die Gussteilequalität ist es nicht mehr zu akzeptieren, dass die Gießsysteme durch Erfahrungswerte von einigen Gießereifachleuten konstruiert werden [163]. Hier müssen moderne Methoden der Modellierung von Gießsystemen angewandt werden. Grobe Angaben von Gießzeit und Laufquerschnitt sind das typische Know-How jeder Gießerei, die sich meistens nur auf eine bestimmte Art von Gussteilen orientieren. Notwendig ist es, den gesamten Weg der Produktentwicklung, bezogen auf die Gießsystemkonstruktion, zu untersuchen. D. h. eine detaillierte Untersuchung der Strömungsvorgänge im Gießsystem, während der gesamten Formfüllung ist erforderlich, um so die Füllvorgänge in der Form zu optimieren. Dazu ist der Einsatz der Computertechnik mit speziell entwickelten Softwareprodukten notwendig.

8.1 Berechnung

Jeder beliebige physikalische Vorgang verkörpert eigentlich einen Zusammenhang zwischen den einzelnen Parametern. Flüssige Metalle zeigen wie Wasser Newtonsches Fließverhalten, solange ihre Temperatur über Liquidus liegt, d. h. dass zwischen der Deformationsgeschwindigkeit und der Spannung eine lineare Abhängigkeit besteht.

Die Gewinnung von Informationen über den Charakter der Bewegung von geschmolzenen Metallen in Gießsystemen und Formhohlräumen ist extrem schwierig. Daher findet die Methode der Modellierung eine große Bedeutung. Man nutzt überwiegend die Methode der physikalischen isothermischen Modellierung.

Die Ähnlichkeitstheorie ist eine Methode für die wissenschaftliche Verallgemeinerungen, die aus Experimenten, gewonnenen werden. Aus den allgemeinen Navier-Stokesschen-Gleichungen sind Kriterien abgeleitet. Dimensionslose Ähnlichkeitskriterien, die die relative Bedeutung der verschiedenen Mechanismen von Diffusion und Konvektion charakterisieren, sind die Reynolds-, Froude-, Peclét-, Weber-, Morton-, Prandtl- und Schmidt-Zahl. Koreny und Krenek [164] beschreiben in ihrem Beitrag den Einsatz dieser Methode für das Studium der Strömung in einem Turbinengehäuse. Tabelle 5 zeigt, dass für Stahlguss die Werte von Vergleichskriterien ausgearbeitet wurden. Allerdings ist es notwendig auch für andere Gusslegierungen diese Ähnlichkeitskriterien auszuarbeiten.

Mit der Entwicklung von numerischen Methoden zur Lösung von Differentialgleichungssystemen [165] und mit der ständig steigenden Computerleistung sind heute die Strömungsvorgänge überwiegend mit Computersimulation zu berechnen. Ein Hauptunterscheidungsmerkmal der in der Literatur bekannten Ansätze zur Modellierung des Gießens ist die verwendete Formulierung der Bewegungsgleichung. Es finden sich sowohl Modelle mit einer ortsfesten Beschreibung (*Euler*-Formulierung), bzw. mit einer materialbezogenen *Lagrange*-Formulierung, als auch mit einer gemischten, sogenannten ALE-Formulierung [166].

Tabelle 5 Werte von Ähnlichkeitskriterien für das Wassermodell mit der Anwendung bei Stahl-Systemen [157]

<i>Zahl</i>	Stahl-System	Wassermodell
Reynolds	1	1,1
Froude	1	1
Weber	1	3,1
Morton	1	44
modifiz. Froude	1	7

Die Berechnung der Formfüllungsfront ist die Berechnung einer nichtstationären Strömung. Um die Wirkung von einzelnen Elementen auf die Strömungsvorgänge zu untersuchen, kann mit einem stationären Model gearbeitet werden.

Das Temperatur- und das Konzentrationsfeld werden nicht nur durch Leitung und Diffusion, sondern auch durch die Strömung bestimmt. In jeder Strömung von Fluiden sind beide Mechanismen (konvektiv und diffus) für den Impulstransport gleichzeitig vorhanden. Gestalt und Verlauf von Strömungs-, Temperatur- und Konzentrationsfeld ergeben sich als Lösungen der **Bilanzgleichungen für Masse, Impuls und Energie** [116,117]. Diese Bilanzgleichungen bilden die theoretisch-physikalische Grundlage einer jeden Gießsimulation.

Mit diesem System von fünf Differentialgleichungen sind die Wärme- und Strömungsprozesse berechenbar. Mit dem Einsatz von numerischen Methoden wie der Methode der finiten Elemente oder der Methode finiten Differenzen, unterstützt von Computertechnik, sind die Berechnungen auch kommerziell nutzbar.

Es ist notwendig die Anfangsbedingungen:

- Geschwindigkeit,
- Temperatur,
- Richtung,
- Querschnitt,

und die Randbedingungen:

1. auf der Wand,
2. auf dem Eintritt,
3. auf der freien Grenze

genau zu definieren.

Diese Aufgabe beschreibt die Entstehungen der Abweichungen der Berechnungen von Realprozessen. Die Prozesse an der Wand sind relativ gut beschreibbar. Die Geschwindigkeit und der Druckgradient sind null. Die Temperatur ist auch eindeutig definiert, obwohl sie über die ganze Kontur auch unterschiedlich ist. Der Wärmeübergang ist problematischer zu beschreiben, da unterschiedliche Kokillenpräparierungen über die gesamte Kokillenkantur auftreten können. Während der nachfolgenden Erstarrung bildet sich ein Luftspalt, der sich aber nicht über die ganze Oberfläche des Gusstückes ausbreitet. Beim Eintritt ändert sich dynamisch sowohl die Richtung als auch die Gießleistung. Der Strömungsquerschnitt ist nur geschätzt. An der freien Oberfläche stellt die Definition der Geschwindigkeit- und des Druckverhältnisse das Kernproblem der Genauigkeit von Randbedingungen dar. So ist z. B. frag-

würdig, ob $p=p_{\text{atm}}$; $v_{n+1}=v_n$ oder $\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial n} = 0$ ist. Die Randbedingungen, durch Hypothesen entstanden, sind auch ein Grund der Unterschiede von Berechnungsmodellen unterschiedlicher Softwarehersteller. An Methoden sind eine ganze Reihe entwickelt worden, z. B.: standard $k-\varepsilon$ Modell (SKE); RNG $k-\varepsilon$ Modell; RNG $k-\varepsilon$ Modell für niedrige Re; RSM–Reynolds 6 Gleichungsmodell; Two-Layer RSM; Large–Eddy Simulation; Smagorinsky SGS; RNG SGS Modell; Quadratic Pressure-Strain Modell; Spalart-Allmaras Modell [167].

Eine weitere Problematik, die mit der Berechnung von Strömungs- und Wärmevergängen entsteht, ist die Bestimmung von physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe im System. Die Viskosität, die Dichte, die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit sind von der Temperatur abhängig. Es gibt 42 konventionelle Al-Gusslegierungen in Deutschland und für jede Legierung soll eine Datenbank für die physikalischen Eigenschaften ausgearbeitet werden [168]. Die chemische Zusammenfassung liegt teilweise in breiten Toleranzen, wobei man unterschiedliche Eigenschaften abhängig vom konkreten Legierungsgehalt erzielen kann. Es ist notwendig festzustellen, ob auf diesem Gebiet noch weitere Untersuchungen zu realisieren sind.

Über die komplizierte Strömungsproblematik, bei der Betrachtung der Oberflächebeschichtung, wurde in [169] referiert. Ein weiteres Beispiel stellen die Autoren in [170] vor, wo der Gasdruck berücksichtigt wird. Die Physiker sind nahe an der theoretischen Beschreibung von allen Prozessen, die die Wärme- und Stoffübertragung charakterisieren, allerdings steht bis heute die notwendige Computertechnik noch nicht zur Verfügung, die so komplexe Aufgaben technisch beherrschen kann.

8.2 Simulation

Die Optimierung von Gussteilen und Gießprozessen fängt mit der Beurteilung der Vorgänge während der Formfüllung, Gussteilerstarrung, Gefügebildung und der Bildung von Eigenspannungen an.

Ein Formfüllvorgang ist eine Kombination aus einem Strömungsprozess mit freier Oberfläche und gleichzeitigem Wärmetransport, mitunter auch der Erstarrung. Bei der theoretischen Beschreibung dieser Transportvorgänge hat es in den letzten Jahren durch den Einsatz numerischer Methoden erhebliche Fortschritte gegeben [171,172], die zu einer Reihe von gießereitechnischen Simulationsprogrammen geführt haben, Tabelle 6 der Anlage. Ein typisches Beispiel der Strömung mit freier Oberfläche zeigt das Bild 69.

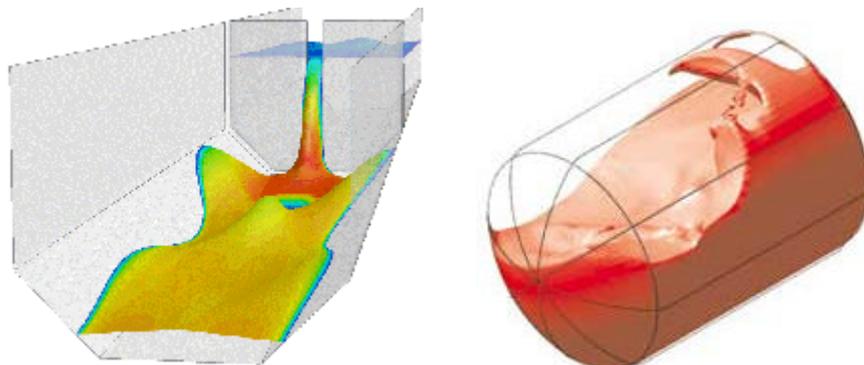


Bild 69 Beispiel der Simulation mit freier Oberfläche, Software Fluent und STAR-CD [27,167]

Bei der Simulation realer Gießvorgänge entsteht eine ganze Reihe von Problemen. Das Grundproblem ist die Tatsache, dass eine Al-Schmelze eine Newtonsche Flüssigkeit verkörpert. Die Oxidhaut an der Oberfläche, die Bildung von Dendriten durch die rasche Abkühlung im Gießsystem und Formhohlraum und die nicht lineare Änderung der Viskosität der Temperatur sind Indizien für nicht Newtonsche Flüssigkeiten. Die Simulationsprogramme rechnen mit einer sog. fiktiven Viskosität, die die Strömung der teilweise erstarrenden Schmelze (die Schmelze strömt mit Dendriten) zu beschreiben hilft [173]. Die Dendriten bilden ein unbewegliches Netz als Anteil der festen Phase mit ca. 0,4 bis 0,7%. Dieses ist jedoch vom Erstarrungscharakter der konkreten Legierung abhängig. In diesem Fall ändert sich der Wert der fiktiven Viskosität um 4 Stellenwerte.

Beim Gießen treten noch weitere Probleme auf; verursacht z. B. durch die Gasdurchlässigkeit des Kernsandtes und die Entlüftung des Gießsystems. Der Gießstrahl ist nur schwer zu beschreiben und die Werte von spezifischen Wärmeübergangskoeffizienten sind überhaupt nicht bekannt.

In Rahmen der Gießsystemoptimierung für Zylinderköpfe wurde festgestellt, dass das Programm SIMTEC zur Simulation von Schwerkraftguss nicht präzise genug ist. Das gleiche gilt auch für das Produkt Nova Flow. Leider war während der Bearbeitung dieser Arbeit kein Zugang zu anderen, weiter entwickelten Simulationsprodukten möglich.

Die Gießsystemfüllung ist eine kritische Etappe des Metalltransports in den Formhohlraum. Zur Simulation wurde die Software FLUENT 5.5 eingesetzt. Wie nach dem Prinzip der Wassermodellierung, wurden die Strömungen auch mit Wasser simuliert. Damit ist in keinem Fall eine gießtechnische Simulation ersetzbar, da es um die Modellierung mit einer Newtonschen Flüssigkeit geht. Das Bild 70 zeigt die realisierten Arbeitsschritte:

1. Erstellung der CAD-Geometrie (ProEngineer),
2. Vernetzung der Geometrie (automatisch mit Tgrid im Fluent, ca. 550.000 Elementen),
3. Angabe von Anfangs- und Randbedingungen,
4. Simulation,
5. Auswertung der Ergebnisse.

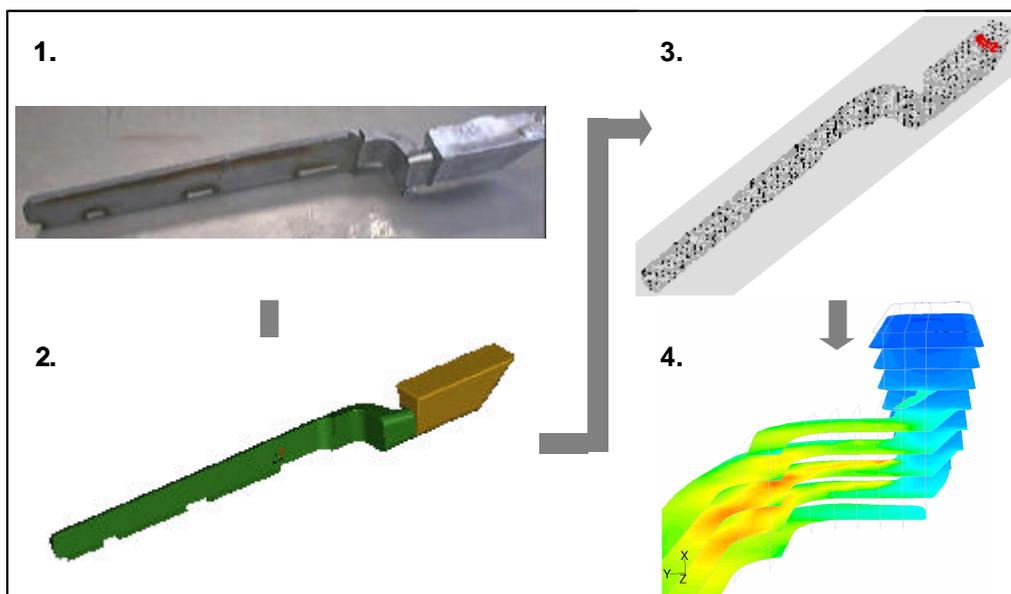


Bild 70 Arbeitsschritte bei der Simulation von Strömungsvorgängen

Es wurden die zwei Geometrien, welche im Bild 61 dargestellt sind, und das Gießsystem mit dem Beruhigungstümpel (Bild 99) simuliert. Das Programm hat bestimmte Funktionen, die die Auswertung der Berechnung erleichtern sollen. So kann man z. B. Bahnlinien¹ von einzelnen Teilchen darstellen, Bild 71. Die Simulation dient zur qualitativen Bewertung, daher ist die Abweichung der Strömungsgeschwindigkeit von der Praxis unbedeutend. Hinter dem vierten Abschnitt des Laufes ist zu erkennen, wie sich die Schmelze zurückzieht und durch den Abschnitt den Formhohlraum füllt. Die kleine „Tasche“ kann (kalte und hochoxydierte) Schmelze am Anfang des Gießens zurückhalten, so dass diese bis zum Ende des Gießens im Gießsystem bleibt.

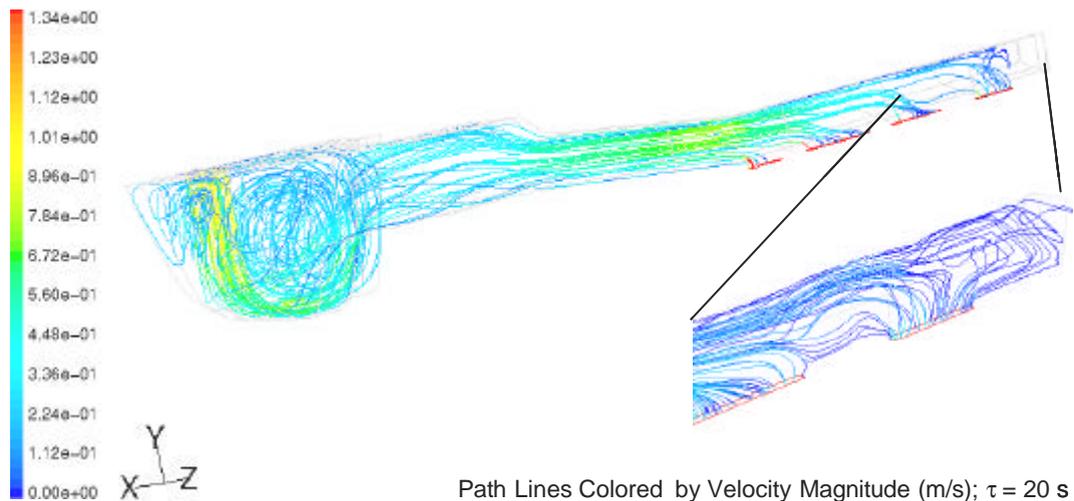


Bild 71 Bahnlinien von fließenden Teilchen; die Farbskala informiert über die Strömungsgeschwindigkeit

Das Bild 72 ist das Ergebnis der stationär gerechten Aufgabe. Eine wesentliche Aussage beinhaltet das Vektorfeld über den Anschnitten. Auch bei stationären Bedingungen wird der Formhohlraum mit schräg angeordneten Gießstrahlen unter den Anschnitten gefüllt. Wegen des hohen Druckes am Ende des Laufes, siehe Bild 75, ist der dritte Abschnitt schnell gefüllt, was zur ungleichmäßigen Formfüllung führen kann. An der Kokillenkontur ist eine blau dargestellte Zwischenschicht sichtbar – es bildet sich eine Grenzschicht.

Im Bild 73 ist das Geschwindigkeitsprofil in den Anschnitten dargestellt. Interessant ist die ungleichmäßige Füllung über die Länge der Anschnitte. Am Deckkern ist eine höhere Geschwindigkeit als an der Kokillenwand vorhanden. Dies beeinflusst die Anordnung von Anschnitten direkt zur geraden Wand am Deckkern. Solche Profile kann man beliebig über dem Raum beobachten.

Im Bild 74 sind schematisch die Geschwindigkeitsvektoren an allen drei Gießsystemen (Tümpel A, B und Beruhigungstümpel) dargestellt. Das Gießsystem mit Beruhigungstümpel zeigt die besseren Ergebnisse. Interessant ist am Gießsystem Typ B die Strömung am Anfang des ersten Abschnittes unter negativem Winkel und dass ein Drittel des zweiten Abschnittes überhaupt nicht gefüllt ist. Die sehr dynamischen Strömungsvorgänge wurden bei diesem Typ schon in der Praxis beobachtet. Eine unzureichende Abschnittfüllung ist auch noch im dritten Abschnitt sichtbar.

¹ Die **Bahnlinie** eines Fluidteilchens ist definiert als der Weg, den dieses Teilchen über die Zeit durchläuft, d.h. als die Menge der sukzessiven Positionen dieses Teilchens im Verlauf seiner Bewegung

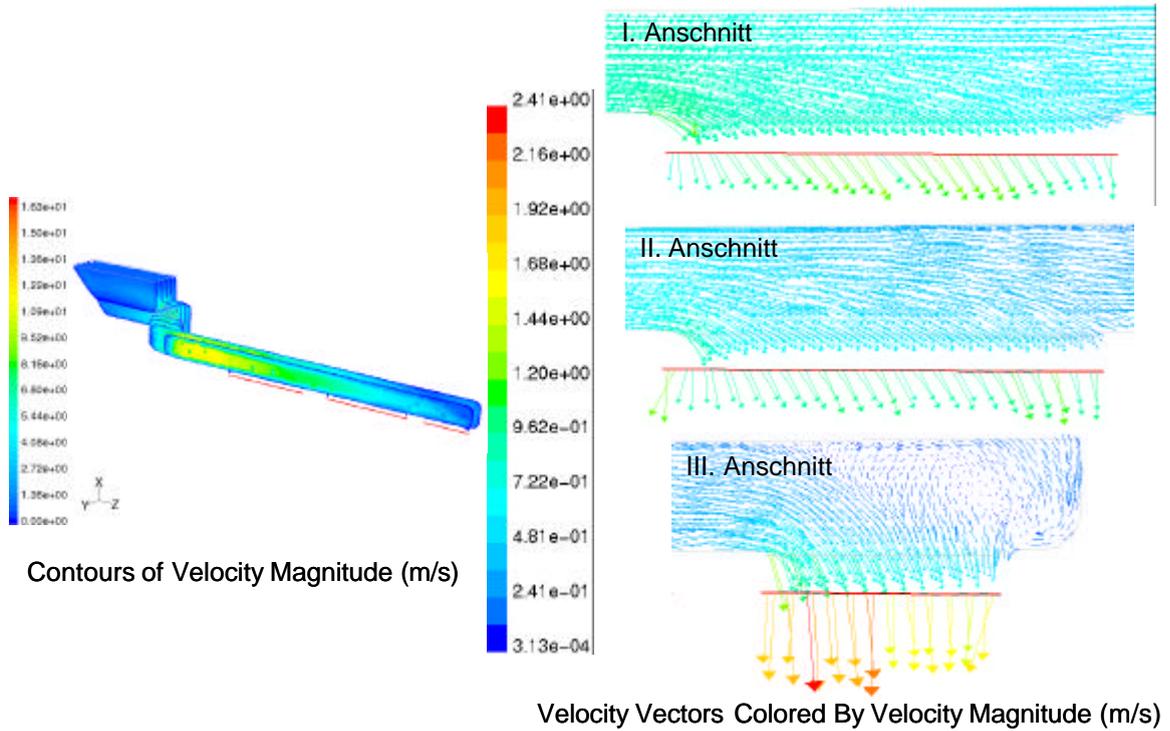


Bild 72 Geschwindigkeitsprofil im Kopfguss-Gießsystem

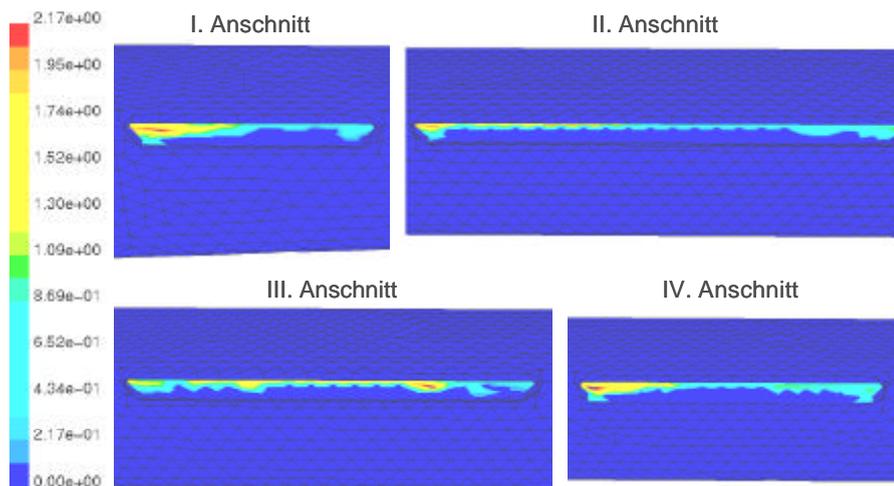


Bild 73 Geschwindigkeitsprofil in den Anschnitten

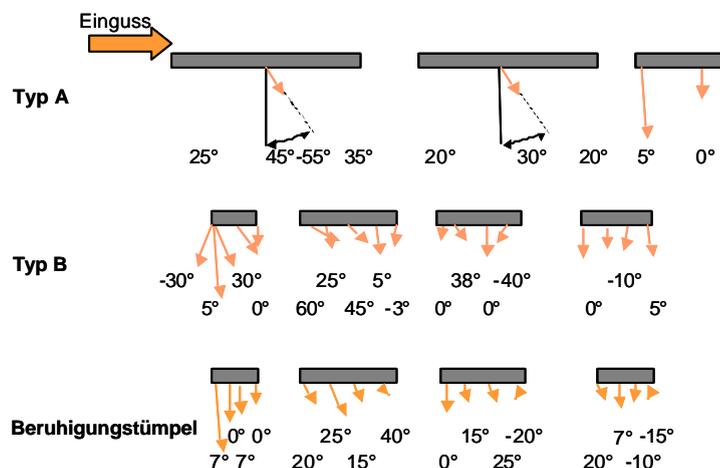


Bild 74 Analyse der Richtung und Größe von Geschwindigkeitsvektoren

Bild 75 stellt die Wirkung einer ungünstigen Konstruktion eines Gießsystems auf die Strömungsvorgänge vor. Der volle Tümpel weist keine Turbulenz auf, aber die ungünstige, durch den Deckkern gestörte Laufkontur weist eine intensive wirbelnde Flüssigkeit auf. Ein großer Geschwindigkeitsgradient verursacht einen großen Druckgradient. Der statische Druck ist auch ein Kriterium, welches den energetischen Zustand der Flüssigkeit beschreibt. Der höhere Druck am Ende des Laufes ist die Ursache der intensiven Formhohlraumfüllung durch den letzten Abschnitt.

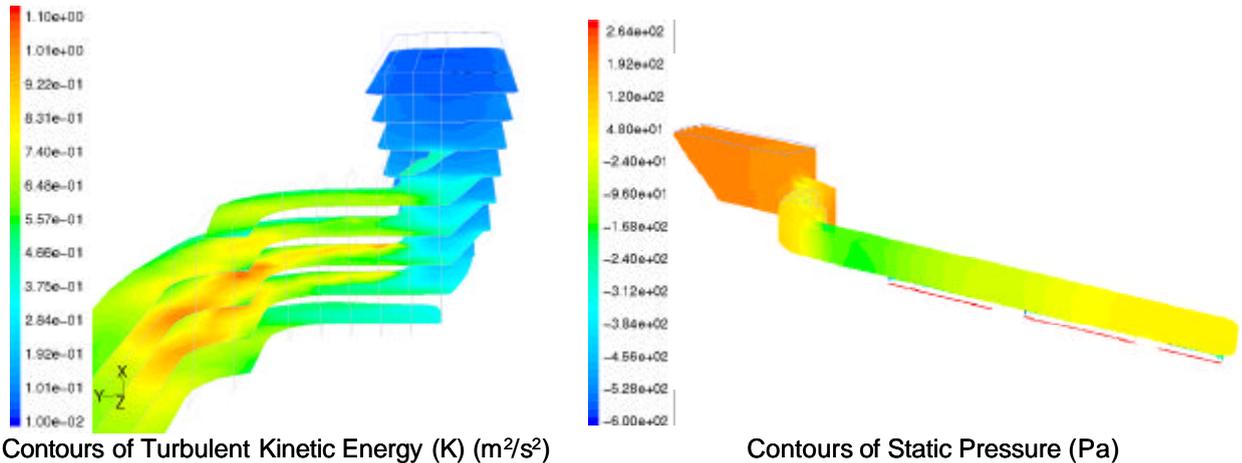


Bild 75 Turbulenz und statischer Druck am gießtechnologisch ungünstigen gestalteten Gießlauf

Wie sich die Druckverhältnisse während des Gießens ändern, zeigt Bild 76. Das Gießsystem links wurde über die ganze projizierte Fläche des Gießtümpels gefüllt. Erst das Gießsystem rechts wurde mit einem Gießstrahl elliptischen Querschnitts gefüllt.

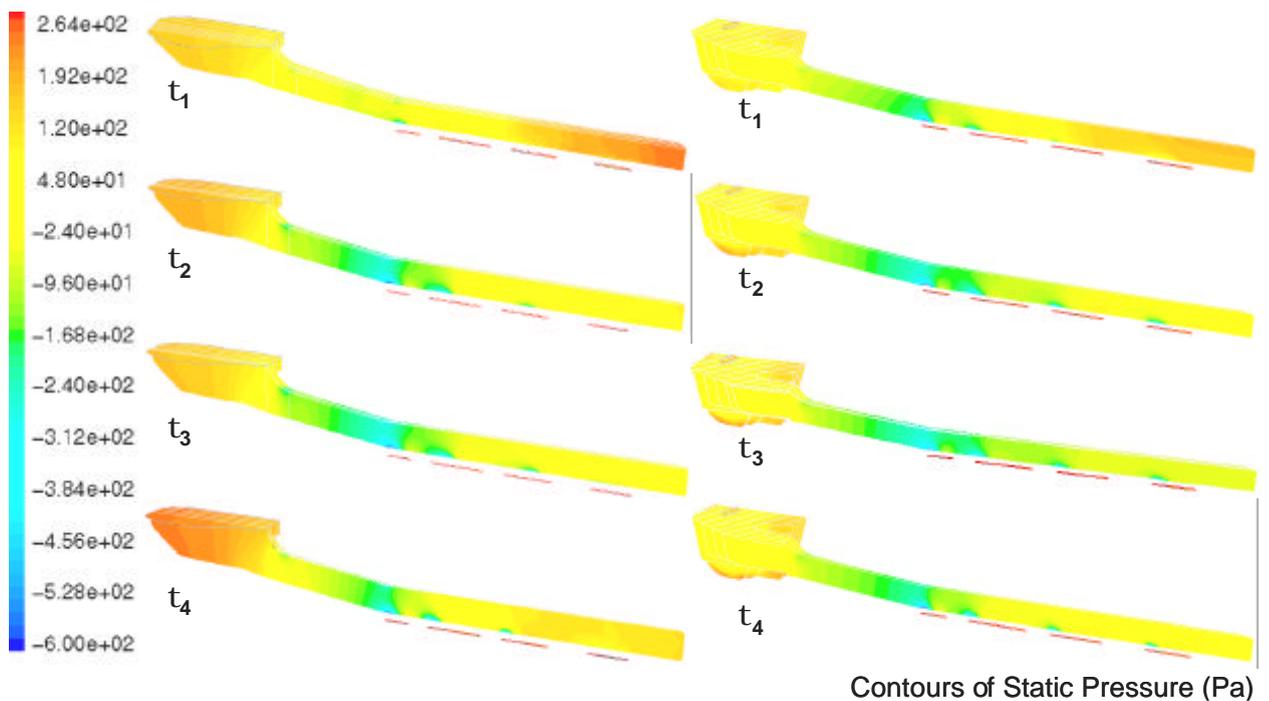


Bild 76 Druckentwicklung im Gießlauf bei nichtstationärer Simulation

In Auswertung einer umfangreichen Recherche und der durchgeführten Simulationen kann man folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die Randbedingungen zur Berechnung der differentialen Bilanzgleichungen wurden anhand einer großen Anzahl von Hypothesen abgeleitet. Dies ist einerseits der Grund für die Abweichungen von den Berechnungen zur Realität und andererseits auch der einzelnen physikalischen Modelle untereinander.
- Die charakteristischen Anfangsbedingungen des Schwerkraftkokillenguss sind schwer definierbar.
- Die Simulationsergebnisse des Programms Simtec verdeutlichen im Vergleich zur Realität, dass das Programm für die Simulation von Gießvorgängen beim Schwerkraftguss nicht einsetzbar ist.
- Die Computersimulation am Wassermmodell hat sich als effektive Ergänzung zur „gläsernen“ Kokille erwiesen. Die Nutzung des Programms Fluent hilft dabei, ein besseres Verständnis über den Strömungsprozess bei der Gießsystemfüllung beim Kopfgussprinzip zu bekommen. Der Einsatz von hydrodynamisch orientierter Simulationssoftware sollte systematisch in den Gießereien (Forschungsinstituten) genutzt werden, um die Wirkung von einzelnen Teilen der Gießsystemgeometrie verifizieren zu können.

9 Durchgeführte Experimente und Ergebnisse

Ursprüngliche Aufgabe der Untersuchungen war eine Optimierung des Gießstümpels für das Kopfgussgießsystem. Mit der Optimierung des Gießsystems sind jedoch noch weitere Prozesse verbunden. Aus diesem Grund wurden die Betrachtungen erweitert. Diese erstreckten sich auf den Metalltransport vom warmhaltenden Ofen zum Gießsystem und durch dieses zum Formhohlraum. Zur Lösung dieser Aufgabe wurden multidisziplinäre Untersuchungsmethoden eingesetzt.

9.1 Untersuchungen am Löffel

Außerordentlich wichtig sind die Geometrie und die Temperatur des Gießlöffels und die Qualität der Löffelpräparierung. Büchen beschreibt in seinem Beitrag die Gießlöffelgeometrie und die Metalldosierung mittels Gießlöffel [63]. Er konzentriert sich dabei auf die Vermeidung des Schöpfens von Metall inkl. Oxidhaut aus dem Badspiegel.

Durch Studien von Videoaufnahmen (Bild 77) wurde festgestellt, dass die Löffelfüllung einen dynamischen Prozess darstellt, dessen Ablauf sich in der Schmelzequalität widerspiegelt. Bei den Untersuchungen wurde beobachtet, dass lediglich der Roboterarm mit dem Siphonschmelzeinlass unter den Badspiegel sank. Um eine Verbesserung der Gussteilqualität zu erzielen, wurde der Roboter so umprogrammiert, dass die Schmelze am Anfang zwar nicht den tiefsten Punkt des Löffels trifft, dafür aber entlang der Wand ruhig in den Löffel hinab geleitet wird. Durch eine geeignete Roboterdrehbewegung wurde ein ähnliches Schöpfen wie vom erfahrenen Gießer erzielt. Das Ergebnis war visuell anhand der Badoberfläche im Löffel erkennbar. Es wurde mittels Thermoelement die Schmelzetemperatur während des Transportes gemessen und daraus die technologischen Maßnahmen für die Löffeltemperierung und die Badtemperatur abgeleitet.

Im Bild 77a sind die Oxidhautreste im Löffel zu sehen. Das Bild 78 zeigt einen 12 g schweren großflächigen Oxidhautrest aus dem Gießlöffel nach dem Abguss. Die Dicke der Oxidhaut bewegt sich zwischen 0,1 und 1,3 mm. An den vollautomatisierten Gießplätzen ist die Reinigung der Gießlöffel von Mitarbeitern nicht vorgesehen. Daher sollte die Löffelschichte regelmäßig kontrolliert und erneuert werden und beispielsweise eine Reinigung der Innenkontur mit Druckluft realisiert werden.



Bild 77 Phasen der automatischen Löffelfüllung
 a) Phase 1: Schmelze fällt vom Siphoneinlass zum Löffelboden
 b) Phase 2: Großflächiger Atmosphärenkontakt bei der Löffelfüllung
 c) Phase 3: Intensive Verwirbelung an der Löffelkontur



Bild 78 Oxidhautreste nach dem Abguss von AlSi6Cu4 im Bereich der Gießschnauze mit den Gesamtabmessungen (a) und der Dicke (b) /Angaben in mm/

Die Oxidhautreste sollen zweckmäßiger Weise zum Ende des Gießens in den Tümpel rollen. Aus diesem Grund ist es erforderlich, dass der Löffel über Kopf geschwenkt wird, um das Herausrollen zu erleichtern. Mit Druckluft kann dies unterstützt werden. In keinem Fall darf die Peripherie der Gießanlage mit Oxidhautresten verschmutzt werden. Der Löffel sollte in Wartepausen und auch gelegentlich bei der Wartung mit dem Gasbrenner temperiert werden. Bei längeren Taktzeiten ist zu empfehlen, den Gießroboter über dem Warmhalteofen zur Temperierung zu positionieren. Wegen der hohen thermischen Belastung des Roboterarms ist eine entsprechend hitzebeständige konstruktive Ausführung notwendig.

Fasst man die Untersuchungen zusammen, so kommt man zu dem Schluss, dass schon der Transport der Schmelze vom warmhaltenden Ofen zur Kokille mit einer Verschlechterung der metallurgischen Qualität der Schmelze einhergehen kann. Durch eine geeignete Löffelgeometrie, eine gute Oberflächenpräparierung, die Sauberkeit des Löffels sowie eine optimierte Roboterbewegung sind solche Effekte minimierbar.

9.2 Abgießen

Hinsichtlich des sich an die Löffelfüllung und den Schmelzetransport anschließenden Abgusses ist es notwendig, sich mit folgenden Parametern zu beschäftigen:

- Gießkurve (Gießleistung),
- Gießstrahlcharakter,
- Auftreffbereich,
- Fallhöhe und
- Tümpelgeometrie.

Im Folgenden wird auf die genannten Parameter detailliert eingegangen.

9.2.1 Gießkurve

Die Tümpelfüllung steht im direkten Zusammenhang mit der Gießsystemfüllung und damit mit der Gießkurve. Eigenen Untersuchungen zufolge können drei verschiedene Typen von Gießkurven eingestellt werden. Diese sind im Bild 79 schematisch dargestellt. Für jedes Gießsystem ist es notwendig, eine andere Gießkurve vorzuprogrammieren. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Schluckkapazität der verschiedenen Gießsysteme.

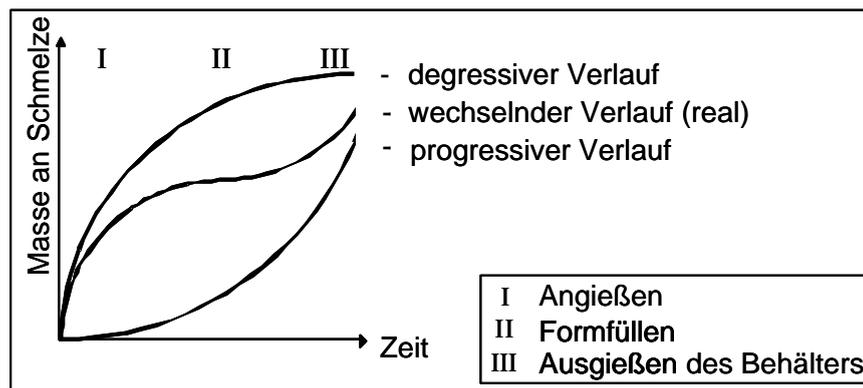


Bild 79 Verlauf der Gießleistung in Abhängigkeit von der Masse und der Zeit

In Kapitel 7.2 wurde bereits die „gläserne“ Kokille von A. Rautenbach beschrieben, und auch erklärt, warum das Wasser als Modellflüssigkeit erfolgreich einsetzbar ist. Zur Ermittlung der Gießkurven wurden ebenfalls eigene Untersuchungen mit einer Versuchsgießeinrichtung vorgenommen. Es wurde dabei mit den von Rautenbach [162] vorgeschlagenen Steuerungsparametern begonnen. Die Tümpelfüllung wurde anschließend weiter verbessert. Aus dem Grunde wurden die Gießkurven neu programmiert. Zielstellung war eine Tümpelfüllung in folgenden Phasen:

- Phase 1: langsames Ankippen des Gießlöffels zur ruhigen Einleitung des Gießstrahles in der ersten Phase des Gießprozesses (es entstehen keine großen Verwirbelungen und Flüssigkeitsspritzer),
- Phase 2: schnelles Füllen des Tümpels,
- Phase 3: Halten der maximalen Höhe des Badspiegels.

Danach wurden die gleichen Abgüsse unter Nutzung einer Messeinrichtung durchgeführt. Dabei wurde die dosierte Menge durch einen Sensor unter dem Behälter ermittelt (Bild 80).



Bild 80 Schematische Darstellung der Versuchsdosiereinrichtung

Die ermittelten Parameter und die Gießleistungen sind aus den Bildern 81 und 82 ersichtlich. Die Untersuchungen ergaben, dass trotz deutlich anderer Steuerungsparameter die Gießzeit fast übereinstimmte (11,5 s gegenüber 12 s). D. h. man kann in einer bestimmten Gießzeit eine identische Menge an Metall dem Formhohlraum unter einem ganz anderen Gießregime zuführen. Wichtig ist, dass der Gießtümpel vom Beginn des Gießens bis zum Ende voll gehalten wird. Der Wendepunkt lag bei 5,1 s, d. h. es waren schon 3,65 l vergossen. Ein voller Tümpel entspricht einer Löffellage von 63°. Die gemessene Abhängigkeit (Bild 82) weist einen fast linearen Verlauf auf. Ein Resultat der Untersuchungen ist der Aspekt, dass nach Erreichung des vollen Tümpels in „kürzerer“ Zeit, die im nachfolgenden vom Löffel in den Tümpel zu transportierende Menge an Schmelze konstant gehalten werden muss. Dies ist steuerungstechnisch sehr anspruchsvoll.

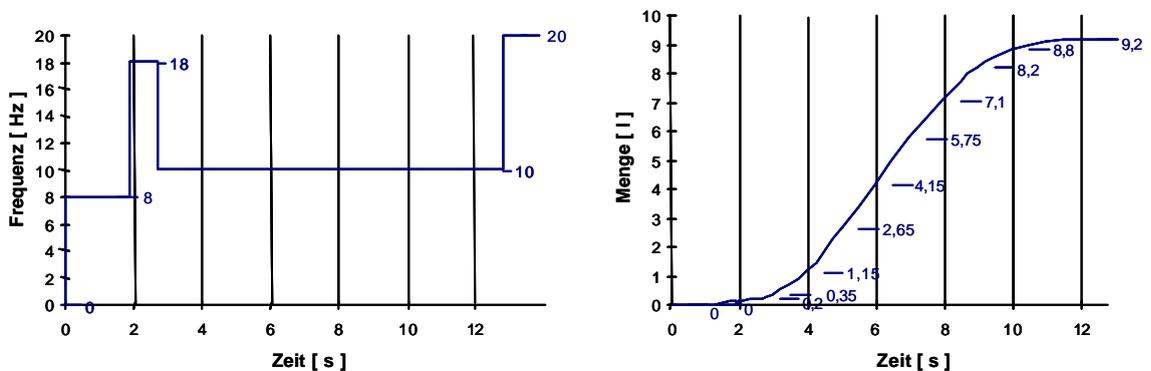


Bild 81 Steuerung des Kippens des Löffels nach Rautenbach [162] und gemessene Gießleistung

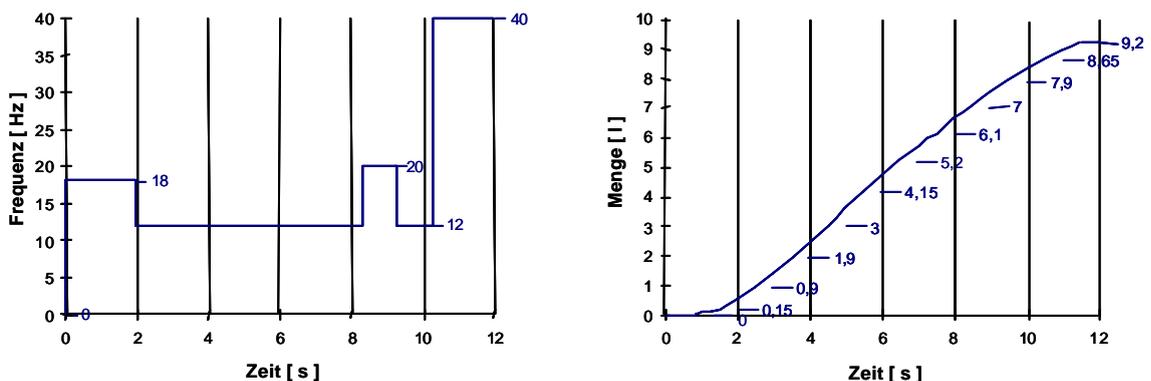


Bild 82 Neue Steuerung des Kippens des Löffels und gemessene Gießleistung

9.2.2 Gießstrahlcharakter, Auftreffbereich und Fallhöhe

Es reicht nicht aus, eine Empfehlung nur auf die Gießgeschwindigkeit zu konzentrieren. Die Qualität des Gussstückes wird von einer ganzen Menge weiterer Faktoren beeinflusst. Diese Faktoren galt es zu ermitteln. Dazu wurden eine ganze Reihe von Videoaufnahmen an einer Versuchsgießeinrichtung mit Wasser als Modellflüssigkeit (Bild 83) und auch an der realen Kokille durchgeführt.



Bild 83 Videotechnik für Strömungsaufnahmen an der Versuchsgießeinrichtung zur Strömungsmodellierung mit Wasser

Die verwendete Hochgeschwindigkeitskamera des Typs Kodak EKTAPRO EN erfasst 500 Bilder/sec. und kann Aufnahmen von 6s-Dauer speichern. Das Gießsystem sollte max. in 5s gefüllt sein, d. h. die Videotechnik entsprach den gestellten Anforderungen. Die Gießstümpel für die Untersuchungen wurden teilweise im Originalzustand aus Kokillen demontiert. Die vordere Seite wurde mit Plexiglas verblendet und mit einem Loch entsprechend der Fläche des Einlaufquerschnitts (rechtes Photo im Bild 83) versehen. Es wurden die veränderliche Strombreite, der Strömungsquerschnitt, der wandernde Auftreffbereich und die zweiphasige Strömung sowie der Einfluss der Gießschnauzenform auf den Gießstrahl beobachtet (Bild 84). Die Geometrie der Gießschnauze wurde mittels Modellplastiline variiert.

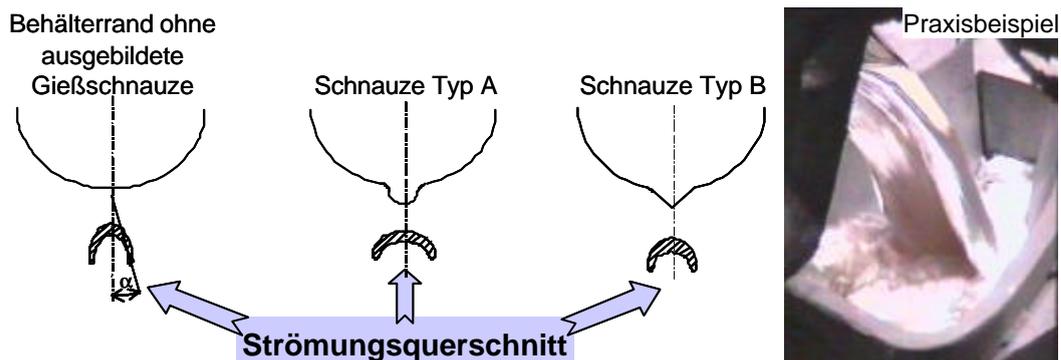


Bild 84 Einfluss der Gießschnauze auf den Querschnitt des Gießstrahles (Strömungsquerschnitt im definierten Abstand vom Behälter)

Der Gießstrahl soll möglichst einen kompakten Querschnitt mit einem günstigen Verhältnis der Querschnittsfläche zum Umfang aufweisen. Das günstigste Verhältnis ergibt sich für einen Querschnitt in Form eines Kreises mit 1,1. Typ A weist ein Verhältnis von 0,8 und Typ B von 0,6 auf. Der Löffel ohne Gießschnauze weist ein Ergebnis von 0,4 auf und ist damit nicht zweckmäßig.

Weiterhin wurde die Wirkung der Fallhöhe untersucht. Mittels des Wassermodells konnte bestätigt werden, dass beim vollen Tümpel und niedriger Fallhöhe das Bad unter dem Gießstrahl sehr ruhig ist und das Mitreißen von Luft minimiert wurde. Im Bild 85 sind die drei Phasen der Tümpelfüllung dargestellt. Die Tümpelfüllung verläuft bei leerem Tümpel (Photo 1) sehr schnell, wobei der Gießstrahl große Luftblasen mit sich reißt. Das zweite Photo zeigt den fast vollen Tümpel, bei dem durch den hoch positionierten Gießlöffel immer noch die Luft mitgerissen wird. Das dritte Photo zeigt den idealen Fall: eine „einphasige“ Strömung bedingt durch den vollen Tümpel und die kleine Fallhöhe. Bei Aluminium wird das Mitreißen von Luft unter solchen Bedingungen (voller Tümpel) ausgeschlossen.

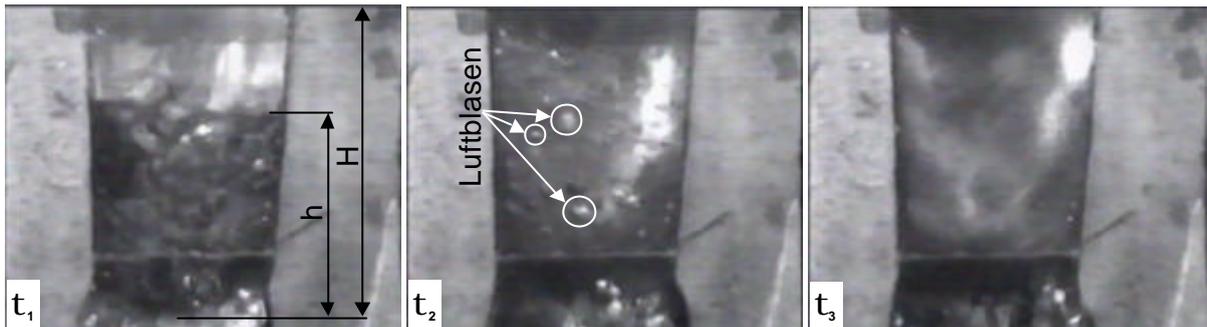


Bild 85 Phasen der Tümpelfüllung bei der Modellierung mit Wasser; aufgenommen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera durch Plexiglas

Die Strömungsvorgänge in der Praxis wurden mittels Videoaufnahmen einer konventionellen und einer Hochgeschwindigkeitskamera (Bild 86) an realen Kokillen dokumentiert. Es wurde festgestellt, dass der Gießstrahl beim Gießen sehr unruhig ist und wandert. Die Gießschauzenspitze sollte zweckmäßigerweise in der Rotationsachse des Löffels liegen (Bild 87a). Mit der unterschiedlichen Gießleistung während des Gießens ändert sich auch, bei stabiler Lage der Gießschauze, der Auftreffbereich (Bild 87b). Das kann bei ungünstiger Tümpelgeometrie die ruhig verlaufende Tümpelfüllung negativ beeinflussen.

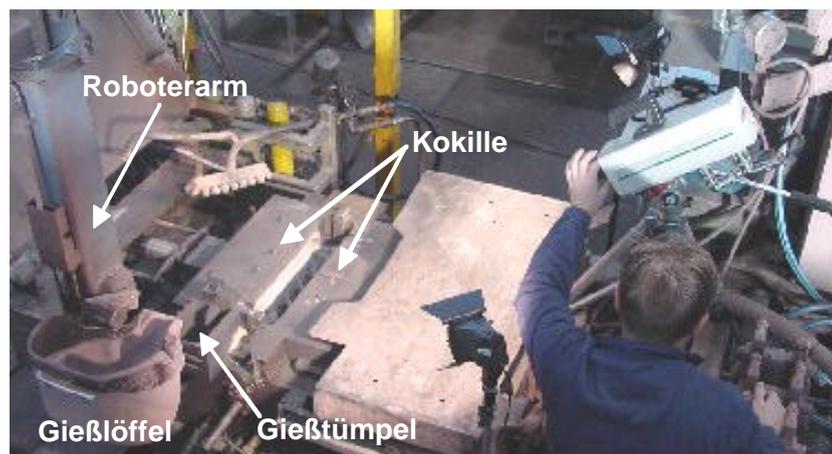


Bild 86 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen an realen Kokillen; Gießroboter mit Gießlöffel in Gießposition

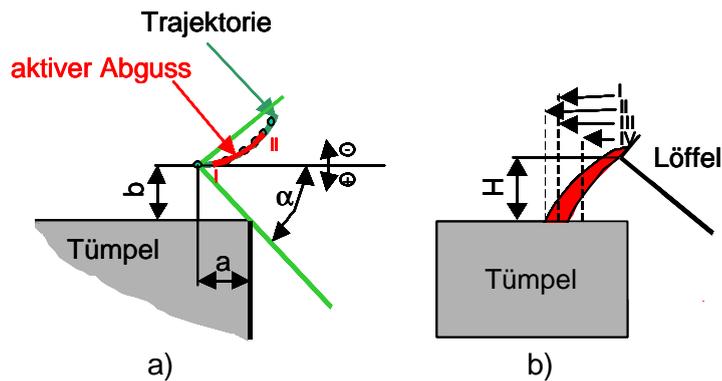


Bild 87 Wanderung des Gießstrahls beim Abguss bedingt durch un stabile Schnauzenpositionierung (a) und veränderliche Gießleistung (b)

Der Gießstrahl kann einen unterschiedlichen Querschnitt während des freien Falles aufweisen. Die Unterschiede beim Handguss und Roboterabguss sind aus dem Bild 88 ersichtlich. Der Gießer schafft zum Gießanfang mit seiner fein motorischen Handbewegung einen deutlich kompakteren und dickeren Gießstrahl als ein Roboter [174]. Das ist hauptsächlich beim Bodenguss erwünscht, weil der Einlauf möglichst schnell gefüllt sein sollte. Der erfahrene Gießer realisiert die in Kapitel 9.2.1 formulierten Anforderungen aufgrund seiner Erfahrungen einfacher als der Roboter – er reagiert flexibel auf das veränderliche Schluckverhalten des Gießsystems. Jede dieser Tümpelbefüllungsetappen ist sicher zu beherrschen. Eine schnelle Erreichung des „Voll-Standes“ des Tümpels ohne Gießschlauchbeschädigung oder weiterer Effekte erfordert hohe Anforderungen an die Roboterprogrammierung.

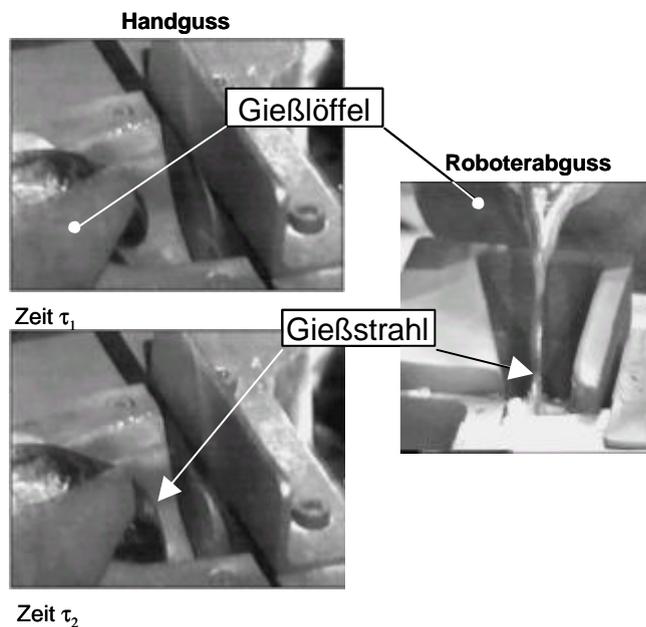


Bild 88 Querschnitte des Gießstrahles beim Handguss (links) und Roboterabguss (rechts)

Im Bild 89 sind zwei Beispiele für den Verlauf bzw. die Gestalt von Gießstrahlen schematisch dargestellt, einschließlich einer Photoserie von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Abgusses. Beim Fall A handelt es sich um einen typischen Hyperboloid und der Fall B charakterisiert die auf den Photos dargestellte dynamische Querschnittsänderung über die ganze Fallhöhe - die „pulsierende Strömung“. Die Querschnittsunterschiede werden charakterisiert

durch die Breite „B“ im Bild 89. Diese Effekte hat schon [63] bei Umfüllprozessen beobachtet, Bild 37. Die Untersuchungen eines solchen Effektes mit seinen negativen Auswirkungen auch beim direkten Abguss sind ein wesentlicher Beitrag dieser Arbeit. Durch das Zerwellen des Freistrahls aufgrund unvermeidbarer Strahl-Turbulenzen reißt die vorhandene Oxidhaut auf (Beschädigung des Oxidschlauches). Damit wird weiterer schmelzflüssiger Werkstoff oxidiert und möglicherweise Luft in die Schmelze eingetragen.

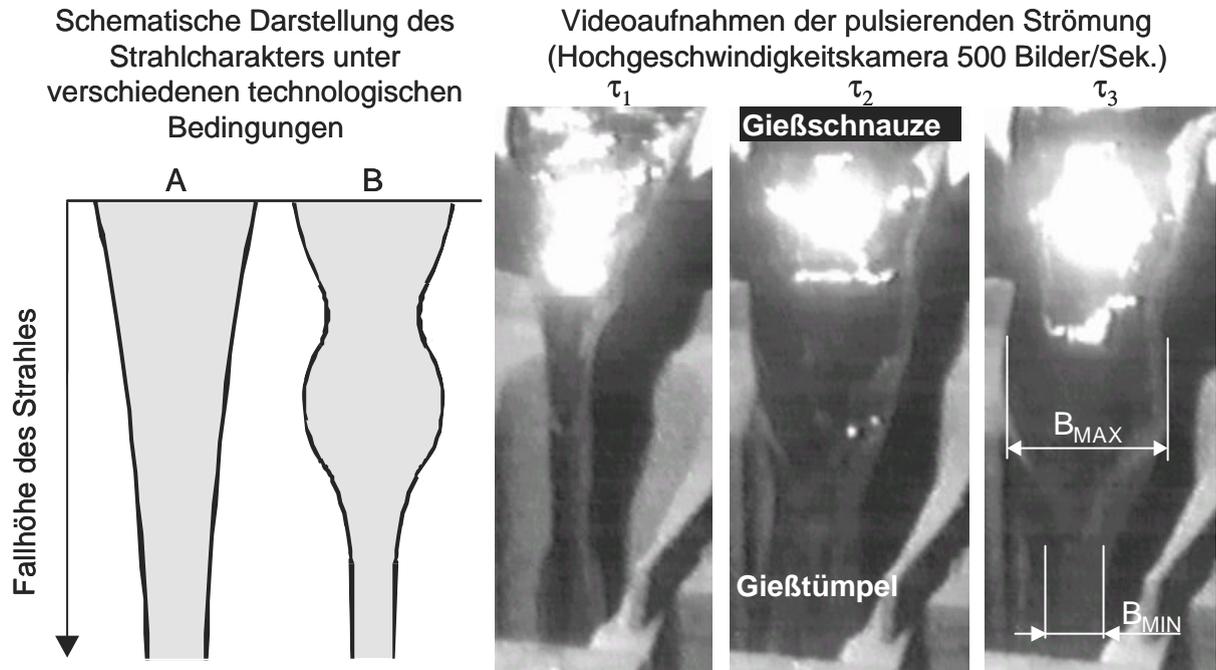


Bild 89 Strahlcharakter beim Gießen von Aluminium und pulsierende Strömung bei technologisch nicht beherrschtem Abguss

Das Strömungsverhalten des aus schmelzflüssigem Werkstoff bestehenden Freistrahls, der beim Entleeren eines Transport- oder Dosiergefäßes aus demselben austritt, wird maßgeblich von der Geometrie des Ausgussbereiches des Gefäßes bestimmt. Bedingt durch die umfangreichen Videoaufnahmen bei unterschiedlicher Variation der Gießbedingungen war es möglich, die Ursachen der pulsierenden Strömung festzustellen. Es handelt sich dabei um:

- die große Fallhöhe,
- die Form der Gießschlauze und
- die Bewegung („Schwappen“) der Schmelze im Löffel.

Wichtig ist es, den Prozess an allen Fronten zu optimieren, d. h. alle drei Faktoren in optimalen Grenzen zu halten. Der Löffel muss sich möglichst nahe am Tümpel senken und auch während des Gießens weiterhin sinken. Daher ist es notwendig, die Hinterkante des Tümpels schmal zu gestalten und den Tümpel an der Kokille so anzuordnen, dass man den Gießlöffel möglichst günstig tief hinab senken kann.

Nur durch die systematische Korrelation der Ergebnisse am Wassermmodell und an der Kokille beim Al-Abguss war es möglich, eine Gießschlauzenform zu entwickeln, die einen ruhigen Abguss sichern kann (Bild 90). Das Ergebnis der Forschungsarbeiten führte des Weiteren zur Anmeldung eines Patentes mit folgender Bezeichnung: „Gießschlauze eines Transport- oder Dosiergefäßes für oxidierende schmelzflüssige Werkstoffe“ [175].

Letztendlich wurde die Dynamik des Anhaltens des Roboters vor dem Gießtümpel untersucht, welche eine Bewegung der Schmelze verursacht. Gießroboterantriebe sollten eine langsame Abbremsung vor der Gießposition ermöglichen. Das „Schwappen“ der Badoberfläche unterbricht die Haftung der Oxidhaut an den Seitenwänden der Gießschнауze und unterstützt demzufolge das Mitreißen der Oxidhaut von der Badoberfläche in der Nähe des Ausgusses in den Gießstrahl. Das unterstützt vermutlich die pulsierende Strömung.

Es wird empfohlen mit einer Vorrichtung (kleine Kramme) unmittelbar vor dem Abguss in der Gießposition von Hand die Oxidhaut von der Badoberfläche in der Nähe des Ausgusses zu entfernen. Der Gießlöffel kann des Weiteren noch unter dem Füllloch eine Krammleiste für das Zurückschieben der Oxidhaut besitzen.

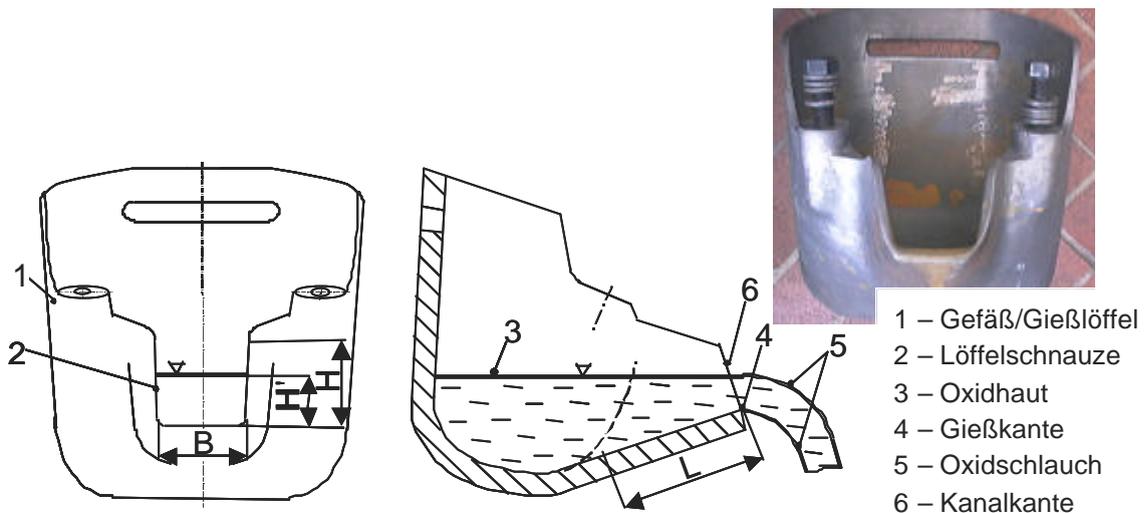


Bild 90 Gießlöffel mit eckiger Gießschнауze und durch die Oxidhaut und den Oxidschlauch vor weiterer Oxidation geschützte Schmelze [175]

9.2.3 Untersuchungen mit dem Ziel der Gestaltung einer neuen Tümpelgeometrie

Die vorgelegte Arbeit knüpft an eine der Thesen der Diplomarbeit von Rautenbach [162] an: „Der Gießtümpel muss als Beruhigungsort für die aus dem Gießlöffel stürzende Schmelze verstanden werden. Es ist unvorteilhaft, die entstehenden Verwirbelungen in das Gießlaufsystem einzutragen. Zukünftige Konstruktionen sollten dies unbedingt berücksichtigen“. Daher wurde eine Gießtümpelgeometrie vorgeschlagen, wie sie im Bild 91 dargestellt ist und eine Reihe von Strömungsuntersuchungen durchgeführt [176]. Wichtig ist die optimale Beleuchtung der Modellteile. Aus diesem Grund wurde mit Auf- und Gegenlicht experimentiert. Die Innenkontur wird durch über eine Zyklode rollende Kugel mit sinkendem Durchmesser gebildet. Der veränderliche Durchmesser der Kugel und damit das Volumen des Tümpels wurden der maximalen Gießleistung und damit einer restriktiven maximalen Strombreite angepasst. Das Volumen wurde gleichzeitig möglichst gering gewählt, um das Ausbringen nicht negativ zu beeinflussen. Durch die neue Innenkontur wird das Metall sehr ruhig in den Lauf geführt. Es ist anzunehmen, dass der Gießtümpel aufgrund seiner Geometrie, das Eindringen von Schmelzoxiden in den Hohlraum der Form zwar nicht verhindert, er unterstützt aber eine schnelle Füllung der Form. Großer Wert wurde auf den Bereich der Anbindung des Tümpels an den Gießlauf gelegt.

Aufgrund einer Studie an realen Abgüssen in der Praxis kann noch eine andere, neue Gießtumpelgeometrie empfohlen werden. Darauf wird im Folgenden eingegangen.

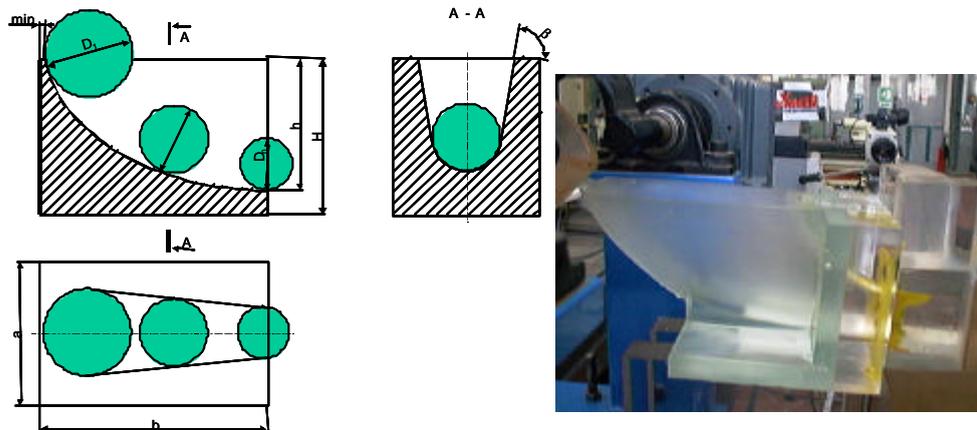


Bild 91 Vorschlag einer neuen Gießtumpelgeometrie und das erzeugte „Glasmodell“

Im Untersuchungsbetrieb wurden bei einem Zylinderkopf (Bild 6) große Qualitätsunterschiede zwischen zwei Gießeinrichtungen festgestellt. Es handelte sich dabei um eine Gießeinrichtung vom Typ A (Bild 92) und ein Gießkarussell. Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurde der Gießprozess umfangreich untersucht. Auf den ersten Blick ist ersichtlich, dass die Gießsysteme anders gefüllt werden und dementsprechend unterschiedliche Tumpelgeometrien vorliegen. Im ersten Fall (Gießeinrichtung Typ A) strömt der Gießstrahl gegen die Seitenwand des Tumpels und im zweiten Fall (Gießkarussell) fließt die Schmelze direkt zum Einlauf. Die Gießanlage mit dem dreieckigen Gießtumpel und indirektem Abguss (Bild 92a) lieferte bessere Qualitätsergebnisse. Hier entsteht die Frage, ob der indirekte Abguss die Ursache der guten Qualität ist oder ob noch weitere, unbekannte Faktoren eine Rolle spielen.

Zur Klärung wurden folgende Aspekte untersucht:

- Schmelzetemperatur unmittelbar vor dem Abguss,
- Temperaturregime der Kokille,
- Unterschiede am Gießsystem (Geometrie),
- Unterschiede beim Abguss (Gießzeit, Fallhöhe, Gießrichtung).

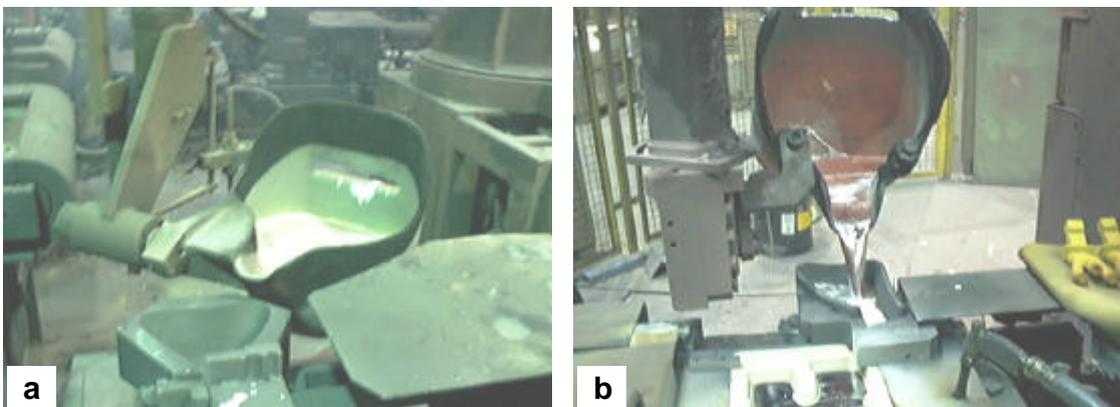


Bild 92 Löffelposition am Gießtumpel
a) „indirekt“- Gießeinrichtung Typ A (siehe auch Bild 39A)
b) „direkt“- Gießkarussell

Es wurden Untersuchungen an der gläsernen Kokille durchgeführt, wobei die Kokille „direkt“ und „indirekt“ gefüllt wurde. Die gläserne Kokille ist nicht identisch mit dem gegossenen Bauteil. Trotzdem reichte ihr Einsatz zum Verständnis der Strömungsvorgänge aus. Es wurde nur der dreieckige Gießtumpel gefertigt und glatt an den Gießlauf angebunden (Bild 93). Beim direkten Abguss ist der Lauf über dem zweiten Anschnitt schon nach 4 s gefüllt, was beim indirekten Abguss erst beim Füllstand in der Kokille bis zur Höhe der Anschnitte erfolgte. Der zweite Anschnitt ist beim direkten Abguss in 1,5 s und beim indirekten in 3,5 s gefüllt. Beim indirekten Abguss entsteht keine typische Luftwelle in 2/3 des Laufes. Diese Ergebnisse sind klar im Bild 94 zu erkennen. Aus diesen Ergebnissen geht hervor, dass die Gießsystemfüllung deutlich durch die Anordnung des Löffels zum Tumpel und durch die Tumpelgeometrie beeinflusst wird.

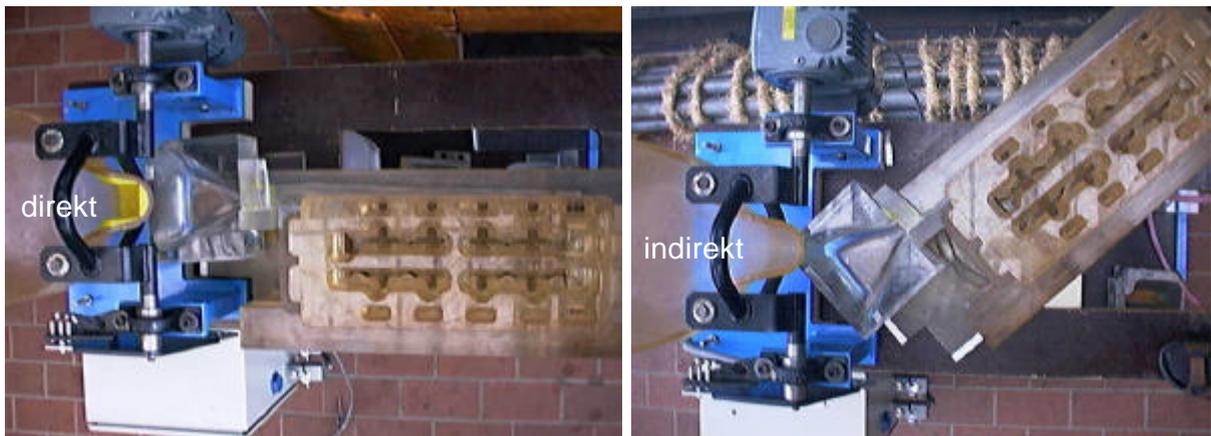


Bild 93 Strömungsuntersuchungen an der gläsernen Kokille mit direktem und indirektem Abguss

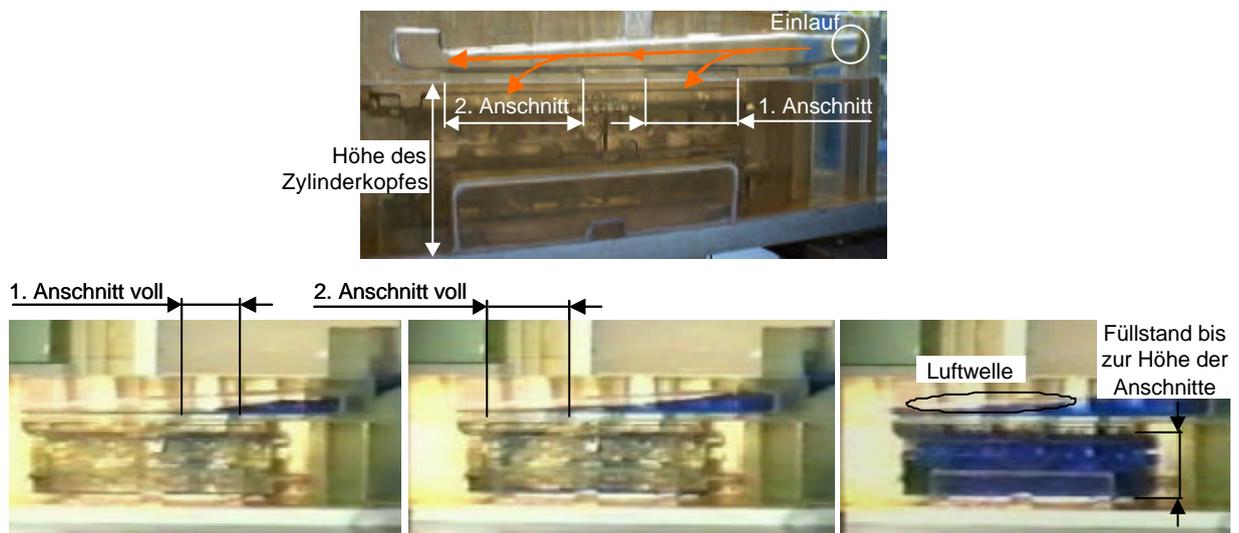
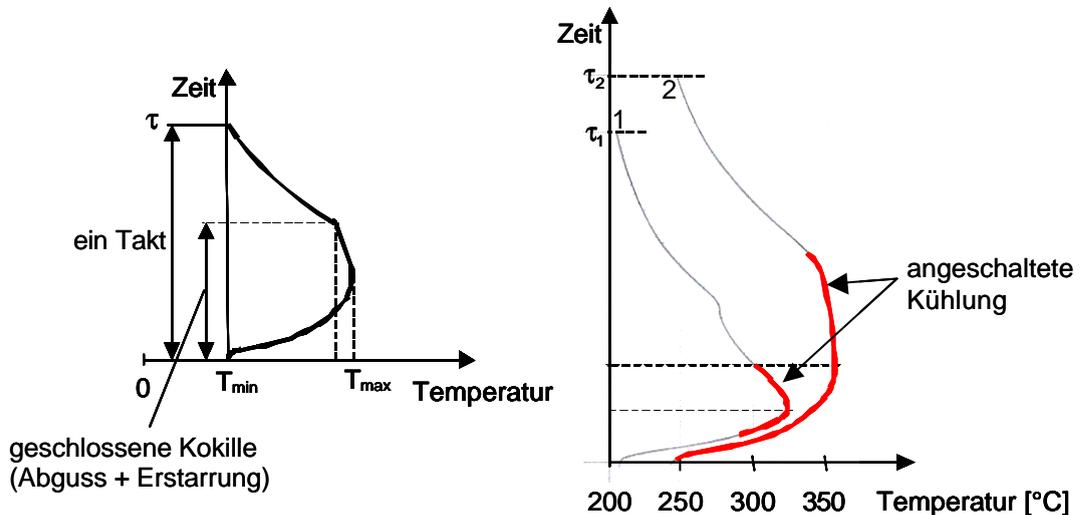


Bild 94 Phasen der Füllung der gläsernen Kokille mit gefärbtem Wasser

Die erste Aufgabe in der Praxis bestand darin, die Prozessüberwachung im Sinne Prozessstabilität, d. h. ob sich die Parameter in einem großen Fenster bewegen, oder relativ konstant bleiben, zu untersuchen. Daher wurden auf beiden Gießplätzen in die Kokillengrundplatten Thermoelemente eingebaut und die Temperatur gemessen. Es wurde festgestellt, dass die Schwankungen zwischen den einzelnen Abgüssen im Bereich bis zu $\pm 3^\circ\text{C}$

liegen. Das ist sehr stabil und führt zu der Überzeugung, dass die Temperaturschwankung in der Kokille beim nicht gestörten Serienabguss für die geplanten Experimente keine Rolle spielt. Als begleitende Untersuchungen wurden die Abhängigkeit der Kokillentemperatur von der Kühlungsintensität und die Dauer zur Erzielung der Prozessstabilität nach einer Pause oder Wartung ermittelt.



Kurve Nr. 1 – Gießeinrichtung GRT; Kurve Nr. 2 – Gießeinrichtung Typ A

Bild 95 Darstellung des Messschriebs der Tempuraufnahmen an den Kokillen

Die Gießanlagen sind mit einer unterschiedlichen Anzahl an Kokillen ausgestattet. Des Weiteren wurden die Kokillen auf beiden Gießanlagen mit unterschiedlicher Kühlmenge gekühlt, was zu anderen Temperaturregimen führte, Bild 95. Die Kühlungsdauer ist an den Temperaturkurven farblich gekennzeichnet. Der Gießrundtisch hat sechs Kokillen und die Gießzelle vom Typ A verfügt über vier Kokillen. Die zugehörigen Zeitregimes zeigt das Bild 96.

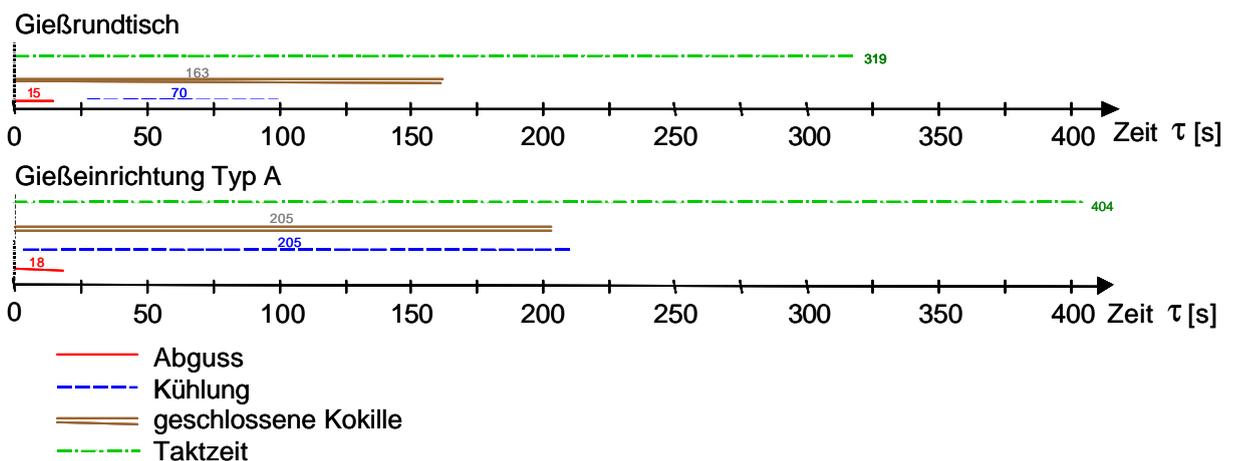


Bild 96 Zeitregime am Gießrundtisch und der Gießzelle mit der Gießeinrichtung vom Typ A

Um die hohe Taktzeit am GRT zu gewährleisten, ist es notwendig, mit zwei Löffeln zu gießen. Am GRT darf man die Gießtemperatur um 20 bis 25°C niedriger einstellen, weil der Gießlöffel beim schnelleren Takt wärmer wird. Es wurde die Temperatur der Schmelze im Tümpel am Anfang und zum Ende des Gießens gemessen und wesentliche Unterschiede

festgestellt. So war die Temperatursenkung am Gießplatz mit der Gießeinrichtung vom Typ A eindeutig intensiver.

Zwischen beiden Gießeinrichtungen existieren bedeutende Parameterunterschiede und daher war es notwendig, die Wirkung der Tümpelgeometrie und des Abgusses unter speziellen Bedingungen zu untersuchen. Weiterhin nutzten beide Gießeinrichtungen separate Schmelzanlagen, womit keine übereinstimmenden Eingangsbedingungen für die Untersuchungen gegeben waren.

Deshalb wurde auf dem Gießplatz beim indirekten Abgießen eine Kokillenmaschine so positioniert, dass der Gießstrahl direkt zum Einlauf strömte. Gegossen wurde an allen 4 Kokillen, um einen serienidentischen Prozess zu sichern. Ausgewertet wurden nur die Teile, die aus einer Charge stammten, d. h. max. 6 Zylinderköpfe pro Kokille. Die Kokillen wurden nach dem gleichen Kühlungsregime gekühlt. Es durfte keine Unterbrechung eintreten und nach keiner Pause gegossen werden. Es ist bekannt, dass zu lange eingelegte Kerne zu Defekten an Zylinderköpfen führen können. Daher sollte auch darauf geachtet werden, konstante Bedingungen unter diesem Aspekt zu gewährleisten. Damit wurden für die Versuche eine identische Gießtemperatur, eine identische Schmelze und ein identisches Temperaturregime gesichert. **Der einzige Unterschied lag in der Abgussart.**

In Auswertung der Untersuchungen entstand nun die Frage, wie man anhand der untersuchten Menge an Teilen (6 und 6 Zylinderköpfe) die eventuellen Qualitätsunterschiede bewerten kann? Als **Vergleichskriterium** für die Qualität wurde die **Porosität incl. Einschlüsse** gewählt. Unter dem Speiser (**Nockenwellenbereich**) wurde die Porosität durch die Dichtemethode bestimmt. Die Zylinderköpfe als relativ großvolumige Teile mit niedriger Porosität (bis 4% unter dem Speiser) können mit der Dichtemethode nicht als kompaktes Teil gemessen werden. Daher wurden aus den gewünschten Bereichen Proben präpariert. Das verwendete Pyknometer hat ein Volumen von $45,1 \text{ cm}^3$. Durch den Halsdurchmesser von 23 mm und die Tiefe von 46 mm des Pyknometers beträgt das maximale messbare Volumen der untersuchten Probe $17,5 \text{ cm}^3$. Für die Dichtemessung an Proben niedriger Porosität sollte das untersuchte Probenvolumen dem max. messbaren Volumen möglichst angenähert werden. Die Istgröße der, in diese Arbeit untersuchten Probenvolumen betrug 9,6 bis 12 cm^3 . Die in der Gießereipraxis üblicherweise verwendeten angegossenen Probestäbe konnten zur Probe mit bis zu 15 cm^3 präpariert werden. Die gemessene Dichte ist beim indirekten Abguss höher als beim direkten Abguss (Bild 97).

Die Porosität wurde im **Brennraum und im Wasserraumkernbereich** mittels computerunterstützter Bildverarbeitung ausgewertet. Es hat sich bewährt, die Proben nach dem Polieren mit $3\mu\text{m}$ -Poliermittel zu ätzen und erst danach mit $1\mu\text{m}$ - und $0,25\mu\text{m}$ -Poliermittel zu polieren und direkt im Anschluss auszuwerten. Es ist notwendig, eine repräsentative Menge von Messungen über eine größere Fläche durchzuführen und statistisch auszuwerten. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Vergrößerung von 20:1 für die Auswertung der Mikroporosität in schnell erstarrten Zonen bei Gussstücken wie z. B. Zylinderköpfen zu klein ist. Für die Auswertung der Oberfläche wird daher die Vergrößerung von 50:1 gewählt, woraus sich eine auszuwertende Messfläche von $1699 \times 1274 \mu\text{m}$, d. h. von $2,16 \text{ mm}^2$ ergibt. An den Zylinderköpfen wurden ca. 20 Messungen pro untersuchtem Bereich durchgeführt. Z. B. im Brennraumbereich wurden 2 Reihen je 10 Messungen bis zu Höhe von 8 mm „gescannt“.

Die ermittelten Ergebnisse zeigen die Graphen im Bild 98. Die Streuung der gemessenen Werte und die Porosität sind wesentlich höher beim direkten Abguss als beim indirekten.

Der direkte Abguss, d. h. die Achse der Gießschnauze befindet sich in gleicher Ebene mit der Einlaufachse, erhöht den Porositätsgrad und die Größe von Einschlüssen im Gussstück. Mit anderen Worten wird beim Einsatz von konventionellen Tümpeln (auch der Tümpel im Bild 91) und klassischer Gießroboteranordnung zur Kokille eine ungünstigere Werkstoffhomogenität als im Fall des Gießens unter speziellen Bedingungen erzielt. Diese speziellen Bedingungen kann man nun folgendermaßen formulieren: **Der Gießstrahl ist am Anfang des Gießens schon im Tümpel zu beruhigen, d. h. die kinetische Energie ist abzubauen.** Die Wände des Tümpels sollten in einem Winkel von 45° zur Waagerechten stehen, da dadurch die Möglichkeit gegeben ist, den Stoß des fallenden Strahles zweimal zu verringern (Kap. 7). Der Strahl ist unbedingt auf diese Wand zu lenken und in keinem Falle auf die Öffnung des Tümpels zum Einlauf zu richten. Die Tiefe des Tümpels ist so groß zu bemessen, dass die auf der Oberfläche schwimmenden Einschlüsse nicht in den Gießkanal eindringen können.

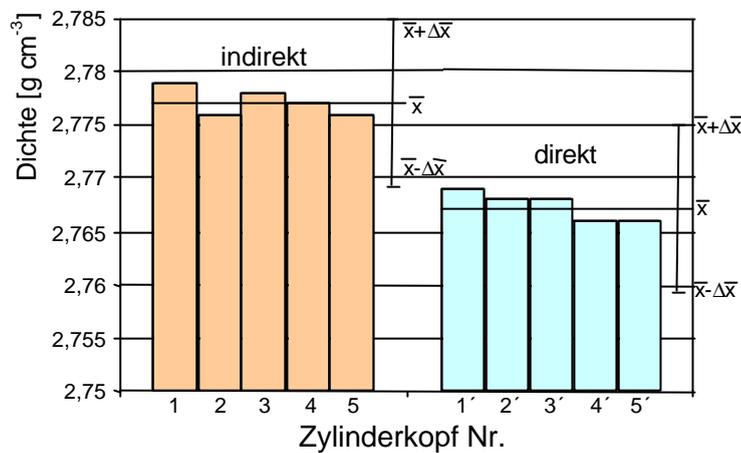


Bild 97 Mittels Dichtepprüfung ausgewertete Porosität im Nockenwellenbereich des Zylinderkopfes

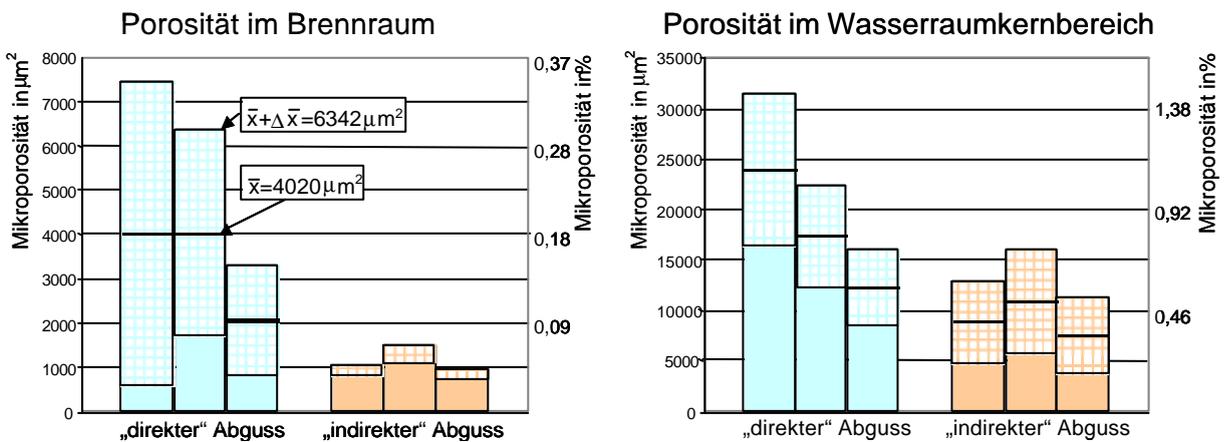


Bild 98 Gemessene Porosität im Brennraum und Wasserraumkernbereich beim direkten und indirekten Abguss

Eine ruhige Einleitung des Gießens darf als Nachteil eine Erhöhung der Gießzeit nach sich ziehen. Die Kokille und hauptsächlich das Gießsystem sind des Weiteren ausreichend zu temperieren.

Mit den parallelen Untersuchungen wurde bestätigt, dass mit längerer Erstarrungszeit der Porositätsgrad wächst.

Eine Bestimmung des prozentualen Anteils an Gas- oder Luftporen sowie Lunkerporen an der Gesamtporosität war mit der genutzten Analyseverfahren nicht möglich. Während der Untersuchungen wurde kein unmittelbarer Vergleich der Qualität zwischen dem indirekten und dem direkten Einguss mit optimierter Tümpelgeometrie durchgeführt. Daher sind die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen bezüglich des Gießprozesses nur eingeschränkt verwendbar. Die Untersuchungen haben jedoch neue Erkenntnisse über die Wirkung von bestimmten Teilen des Gießsystems auf den Strömungscharakter bei der Formfüllung erbracht.

Im Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen kann folgende Zusammenfassung vorgenommen werden: Der Gießtümpel ist als ein **Beruhigungstümpel** auszuführen (Bild 99). Der Gießstrahl füllt über eine fallende Wand kleine Reservoirs und erst danach strömt die Schmelze „ruhig“ in den Lauf zu den einzelnen Anschnitten.

Diese Art der Beruhigung hat neben den beschriebenen positiven Effekten jedoch auch negative Auswirkungen in Bezug auf ein verschlechtertes Ausbringen.

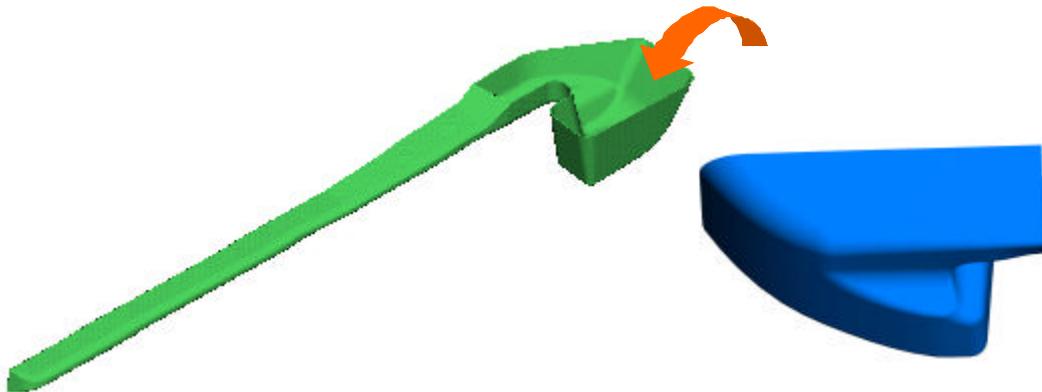


Bild 99 Optimierter Gießtümpel für Kopfguss [177]

Bei der Umsetzung des Abgusses von qualitativ hochwertigen Zylinderköpfen ist des Weiteren auf folgendes zu achten:

- Es ist eine neue Gießroboterprogrammierung beim Löffelschöpfen umzusetzen.
- Es ist notwendig, eine präzise Lage des Löffels in der Rotationsachse sicherzustellen.
- Es ist ein modifizierter Löffel einzusetzen mit einer Gießschnauze nach der patentierten Geometrie.
- Es ist eine Bewegung der Badoberfläche bedingt durch heftige Roboterarmbewegungen beim Abbremsen vor der Gießposition zu vermeiden.
- Es ist eine neue Robotersteuerung zum Abguss zu nutzen, unter Berücksichtigung einer minimalen Fallhöhe während des ganzen Gießens und der Erreichung eines kompakten Gießstrahls zum Anfang des Gießens. Es ist eine neue Tümpelform nach der beschriebenen und patentierten Geometrie zu nutzen.

9.3 Formfüllung

Es wurde schon im Kapitel 6 über die Gießsystemfüllung diskutiert. Hierzu ist es notwendig, die einzelnen Etappen des Metalltransportes zu trennen, detailliert zu untersuchen und zu optimieren. Im Einzelnen handelt es sich dabei um:

- die Geometrie der Anbindung zum Gießlauf,
- den Gießsystemfüllungsverlauf,
- den Formhohlraumfüllungsverlauf und
- die Entlüftung des Gießsystems.

Der Übergang vom Tümpel in den Querlauf sollte möglichst glatt verlaufen. Das Bild 100 stellt zwei Beispiele aus der Praxis dar. Scharfe Kanten verursachen in der Regel Turbulenzen und gerade in dieser Partie Luftansaugungen. Im Gegensatz dazu ließen die Strömungsaufnahmen an der gläsernen Kokille mit dem Tümpel aus Bild 91 keine Luftansaugungen erkennen.

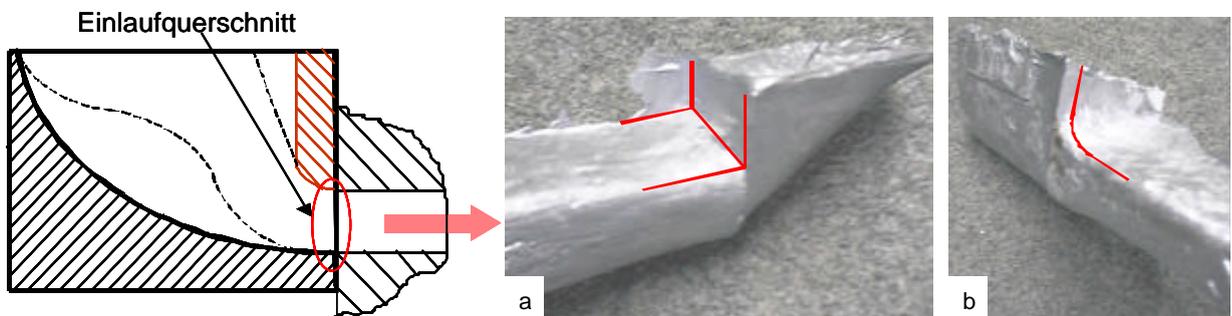


Bild 100 Günstiger (a) und ungünstiger (b) Übergang des Gießtümpels in den Gießlauf

Das Problem der nicht vollständig gefüllten Laufquerschnitte als Gefahr für das Auftreten von Verwirbelungen erwähnt auch Brandenberger [129] in seinem Beitrag. Bei Untersuchungen an der gläsernen Kokille wurde festgestellt, dass sich beim voll gefüllten Querlauf die ansonsten zweiphasige Strömung (Wasser mit Luft) fast vollständig in eine einphasige Strömung des Wassers wandelte.

Der in den Querlauf eingreifende Deckkern verursacht riesige Turbulenzen. Dies muss in jedem Fall verhindert werden. Die Photoserie im Bild 101 zeigt die drei Füllungsphasen der gläsernen Kokille, wobei eindeutig die Beruhigung bei vollem Gießtümpel incl. Gießlauf erkennbar ist. Die erste Füllfront ist eine Wellenströmung. Sie ändert sich sehr schnell in eine Schwallströmung und später in Pfropfenströmung bis Blasenströmung, siehe Bild 60. Mittels dieser Aufnahmen wurde eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,9 bis 1,2 m s⁻¹ gemessen.

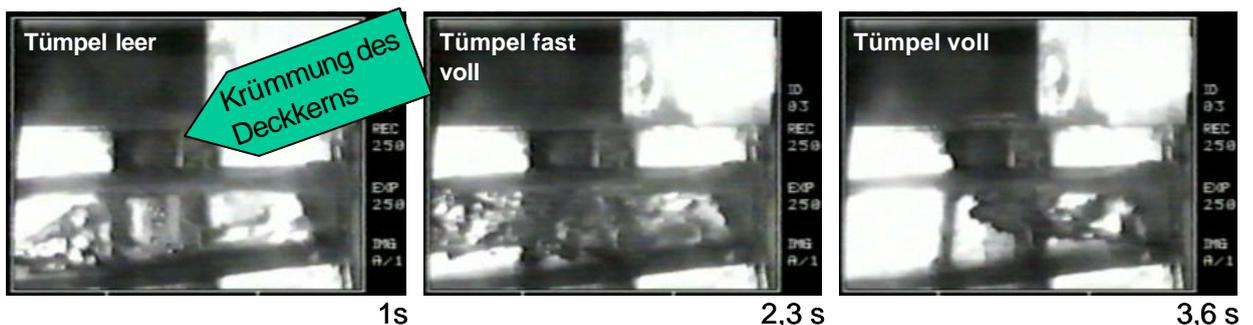


Bild 101 Wassermodellierung am transparenten Gießsystem in drei Füllungsphasen

Die Lauffüllung in realen Kokillen wurde über eine Quarzglasscheibe (Bild 102) mit klassischer Kamera und Hochgeschwindigkeitskamera beobachtet. Um eine gute Aufnahmenqualität zu gewährleisten, war es notwendig, den Hohlraum gut zu beleuchten. Flüssiges Aluminium reflektiert das Licht sehr stark. Dadurch sinkt die Aussagekraft der Aufnahmen. Durch die Aufnahmen ist es erstmals möglich, den Strömungscharakter im Gießsystem zu beobachten. Bisher war nur die Strömung unter den Anschnitten zu sehen (Sicht von oben durch den Deckkern).



Bild 102 Gießsystem mit Quarzglasscheibe und Querlauf nach unterbrochenem Abguss – erstarrende Schmelze unter den Anschnitten

Es wurde bei den Untersuchungen an realen Kokillen festgestellt, dass die Wandkontur der Kokille den Gießstrahl in ungewünschte Partien des Formhohlraumes ableitet (Bild 103). Mit einem roten Ring wurden zwei Bereiche auf dem Wasserraumkern markiert, wohin die Schmelze geleitet wurde. Die Strömung dorthin bricht ab, die Schmelze erstarrt, ihre **Oberfläche oxidiert** (Bild 103a-e). Nach einer bestimmten Zeit wird der Kern mit frischer Schmelze umgegossen (Bild 103f). Es kann passieren, dass die wieder aufgeschmolzene Masse gerollt oder weiter transportiert wird oder die Oxidhaut ihre Kompaktheit beibehält. Solche Effekte können undichten Guss verursachen.

Eine der wichtigsten Anforderungen an das Gießsystem und die Art des Abgusses sind die niedrige Strömungsgeschwindigkeit und keine scharfe Querschnittübergänge. Im Kapitel 9.2. wurde eine Tümpelgeometrie und die dazu notwendigen Abgussbedingungen beschrieben, die eine im Vergleich zum konventionellen Gießsystem ruhige Lauffüllung sichern. Ein weiterer Weg besteht in der Erhöhung des hydrodynamischen Widerstands. Er wird durch jede Umlenkung des Kanals erhöht. Die Betriebserfahrungen mit dem Gießsystem aus dem Bild 61 vom Typ A sind aber sehr negativ. Die Kombination dieser Maßnahme mit einem konventionellen Tümpel ist sehr ungünstig – die Energie des Strahles wird nicht langsam abgebaut, sondern sehr schnell mit der Folge einer starken Turbulenzbildung. Die Umlenkungen müssen der Strömungsdynamik gerecht werden. Hier bietet sich ein breites Entwicklungspotential. Die Basis für die weitere Entwicklung in dieser Richtung kann die Arbeit von Nielsen für den Bodenguss sein [113].

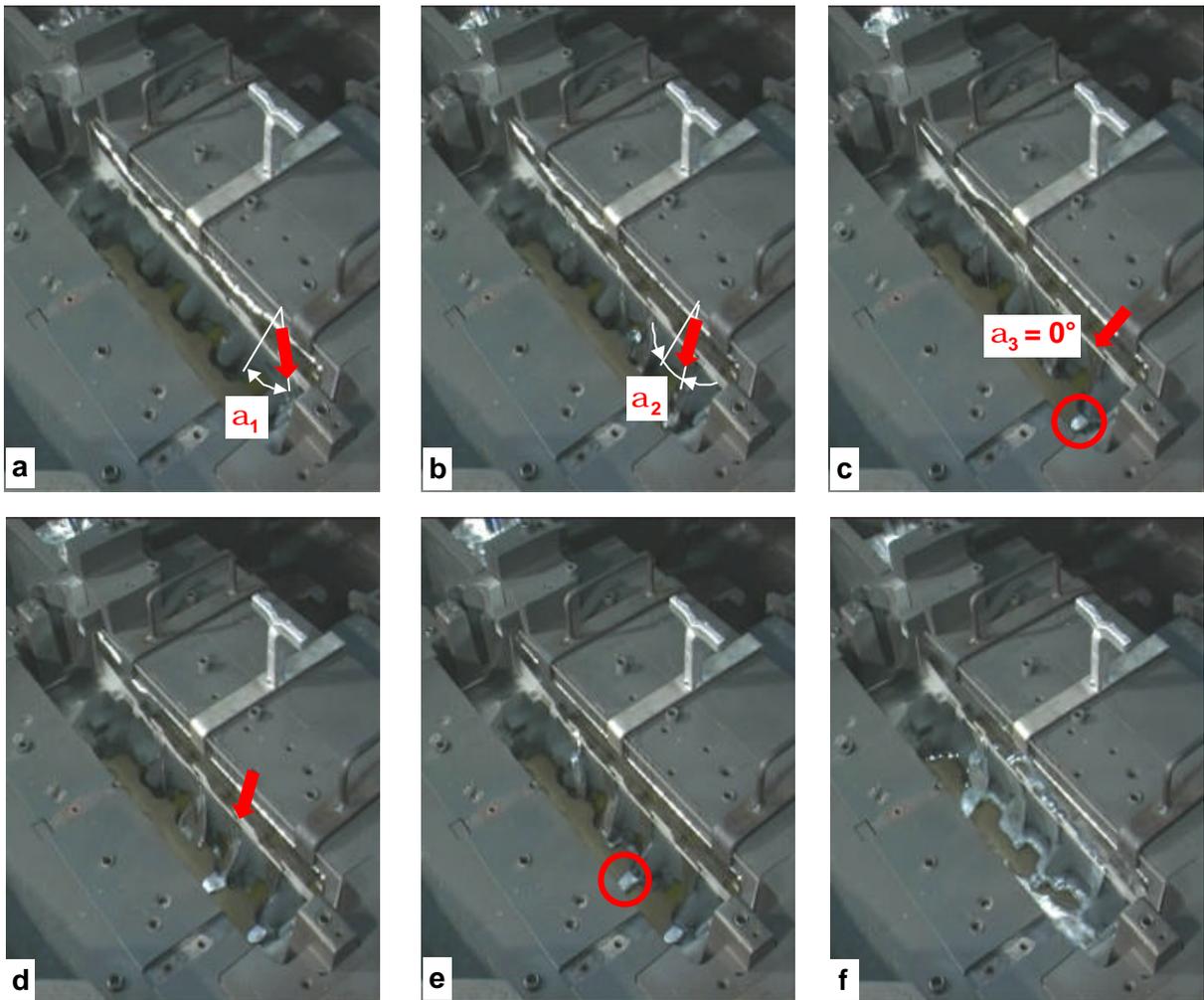


Bild 103 Wanderung des Gießstrahls durch die veränderliche Druckenergie in nacheinander folgenden Füllungsetappen der Gießlauffüllung

Es wurde eindeutig ein anderer Verlauf der Gießsystemfüllung als an der gläsernen Kokille beobachtet. Hauptsächlich wird im Gießsystem nicht erst der erste Anschnitt gefüllt, sondern die Schmelze strömt bis zum Ende des Laufes und füllt zuerst den letzten Anschnitt. Weiterhin war der Lauf in kürzerer Zeit gefüllt und die Luftwelle im oberen Bereich des Laufes wurde nur minimal beobachtet. Es ändert sich eindeutig die Druckenergie, siehe Simulationsergebnisse im Kapitel 8.2 (z. B. Bild 76), die mit gefülltem Lauf steigt. Erst danach ist der Anschnitt unter dem vollen Lauf intensiv gefüllt und die Schmelze strömt relativ senkrecht zur Grundplatte, wie im Bild 103c ersichtlich. Vorher ist auch mit dem Beruhigungstümpel der Gießstrahl unter großem Winkel schräg angeordnet, siehe Bilder 103a,b. Die ersten drei Photos zeigen, wie schnell sich der Strömungscharakter der Schmelze unter den Anschnitten ändert, obwohl der „Beruhigungstümpel“ eingesetzt wurde. Ohne den Beruhigungstümpel sind diese Effekte noch gravierender.

Die mit der Hochgeschwindigkeitskamera gewonnenen Aufnahmen werden durch die 4 Photos charakterisiert (Bild 104). Aufgabe der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen war die Präzisierung von Untersuchungen mit einer konventionellen H8-Videokamera.

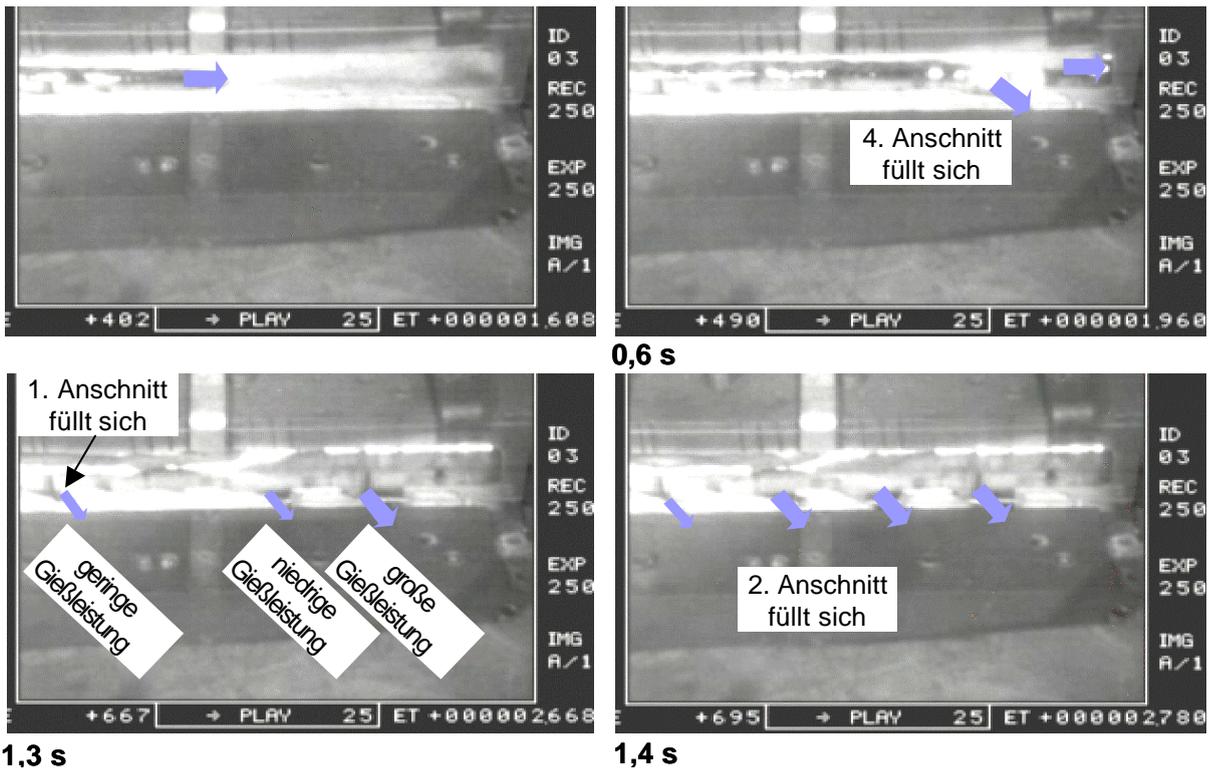
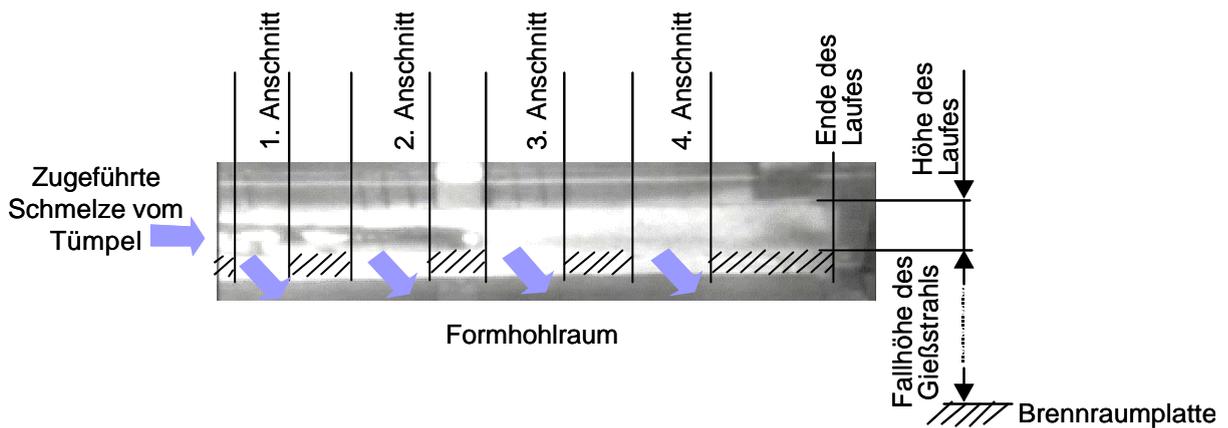


Bild 104 Phasen der Formfüllung, aufgenommen durch die Hochgeschwindigkeitskamera

Es wurde eine Strömungsgeschwindigkeit von $1,4 \text{ ms}^{-1}$ ermittelt. Nach Literaturangaben sollten bei Al-Schmelzen bereits ab einer Geschwindigkeit von $0,5 \text{ m s}^{-1}$ äußere Turbulenzen entstehen [119]. Das konnte nicht bestätigt werden. Ursache ist entweder eine größere Viskosität der Schmelze durch den Kontakt mit der relativ kalten Kokille oder eine höhere Festigkeit der Oxidhaut. Der Gießlauf ist in 2,8 s gefüllt. Die Tabelle 6 stellt die Auswertung der Videoaufnahmen dar. Es ist festzustellen, dass die einzelnen Anschnitte nicht nur zu unterschiedlichen Zeitpunkten gefüllt sind, sondern auch mit unterschiedlicher Gießleistung gefüllt werden. Der zweite Anschnitt wird auch bei vollem Gießlauf nur teilweise gefüllt, was schon die Computer-Simulation gezeigt hat.

Es wurden Untersuchungen mit unterbrochenem Abguss durchgeführt, die eindeutig eine progressive Formhohlraumfüllung unter dem letzten Anschnitt beweisen (Bild 105). Weiterhin ist gleich aus dem ersten Bild ersichtlich, dass der Gießstrahl die Auslasskanalkerne trifft. Das ist eine unbefriedigende Situation, weil durch diese Kanäle der relativ kompakte Gießstrahl zerteilt wird.

Tabelle 6 Ergebnisse der Zeitlupe für die Hochgeschwindigkeitsaufnahme der Gießlauf-füllung

Zeit [s]	Stand	Zeit [s]	Stand
0	Schmelze über 1. Anschnitt	1,3	1. Anschnitt füllt sich
0,1	Schmelze über 2. Anschnitt	1,34	Lauf über 3. Anschnitt voll
0,2	Schmelze über 3. Anschnitt	1,4	2. Anschnitt füllt sich, 3. und 4. Anschnitt voll
		1,7	4. Anschnitt - Schmelze strömt senkrecht
0,4	Schmelze über 4. Anschnitt	1,9	Lauf über 2. Anschnitt voll
		2,1	2. Anschnitt voll
0,5	4. Anschnitt füllt sich	2,6	1. Anschnitt voll
0,6	Schmelze am Ende des Laufes	2,8	Lauf voll
0,8	3. Anschnitt füllt sich, Lauf hinter dem 4. Anschnitt voll		

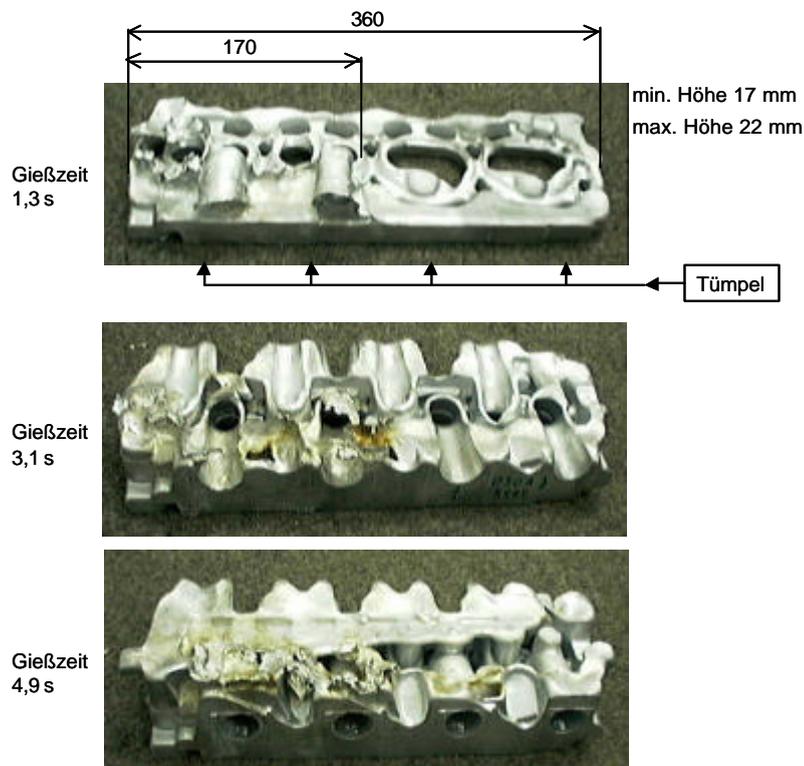


Bild 105 Gusstücke nach dem unterbrochenen Abguss, drei Stufen

Die Entlüftung des Gießlaufsystems im Kopfguss muss möglich sein. Eine durch den Sanddeckkern abgehende Entlüftung äußerte sich als unzureichend. Durch Anbringen von Schlitzen, die vertikal den Gießlauf mit der Oberseite der Kokille verbinden, kann die Luft vor der

Füllungsfront abgeleitet werden, Bild 106. Bei der Modellierung mit Wasser entsteht eine Luftwelle, die detailliert in der Arbeit [162] beschrieben wurde. Durch die Entlüftung mit 3 Rillen (wie auf dem 2. Photo, Bild 106) über die ganze Länge des Gießlaufes war ein solcher Effekt nicht mehr zu beobachten. D. h. die von A. Rautenbach benutzte gläserne Kokille hatte in dieser Richtung starke Defizite.

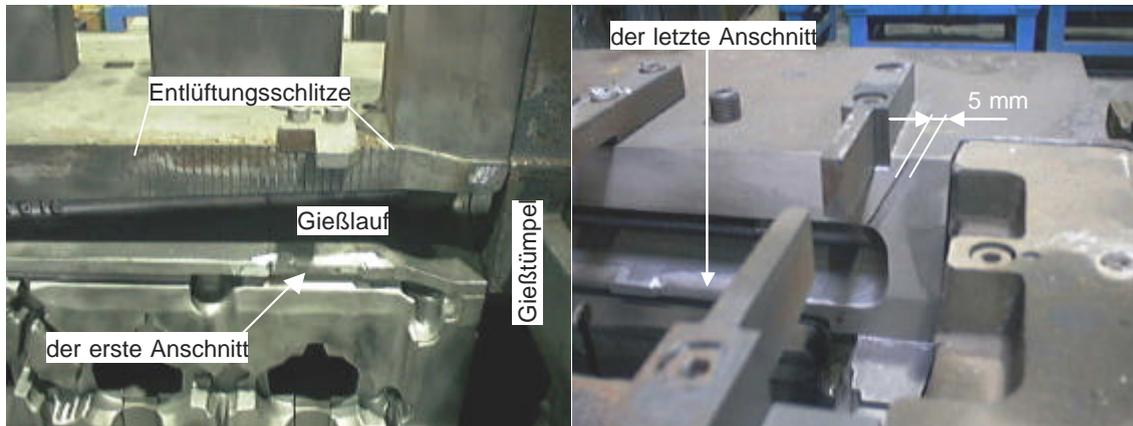


Bild 106 Entlüftung des Gießlaufes über dem ersten Anschnitt und an seinem Ende

Während der Untersuchungen der Formfüllung mit der Videotechnik wurde mehrere Erkenntnisse über den Verlauf der Füllungsfront im Gießsystem und im Formhohlraum gewonnen.

Fasst man die Untersuchungen zusammen, gelangt man zu folgenden Aussagen:

- scharfe Kanten sollen im Gießsystem vermieden werden,
- das Gießsystem erfüllt die gewünschte Funktion erst im vollen Zustand,
- der Gießlauf sollte hinter dem letzten Anschnitt weiter ausgeführt werden und möglicherweise mit einer „Tasche“ enden,
- eine mögliche Ursache des undichten Gusses im Wasserraumkernbereich wurde bestätigt, es ist der wandernde Gießstrahl unter den Anschnitten. Weiterhin konnten der Formhohlraum:
 - mit Inertgas gefüllt und,
 - der neu entwickelten „Beruhigungstümpel“ eingesetzt werden,
- das Gießsystem sollte ausreichend entlüftet werden.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Die Herstellung von Al-Gussteilen mit Wandstärke unter 3 mm, mit guten mechanischen Eigenschaften und hoher Temperaturwechselbeständigkeit, auch ohne Anwendung von Vakuum, Nachspeisung und weiteren prozesskostenerhöhenden Technologien, ist ein Qualitätsziel.

Die Untersuchungen in der vorgelegten Arbeit beziehen sich auf ein hochbeanspruchtes Gussteil der Automobilindustrie mit dem Ziel, den Ausschussanteil deutlich zu verringern. Inhalt ist die Optimierung des Gießvorganges beim Kokillenguss von Al-Legierungen zur Herstellung dieses Bauteils. Es handelt sich dabei um einen Zylinderkopf.

Die wesentlichen Gussfehler wurden analysiert und die Ursachen ermittelt. Die Dichtheit des Gussstückes ist der wichtigste Qualitätsparameter. Die Einschlüsse und die Porosität sind dann Qualitätskriterien, wenn sie die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflussen. Im Kap. 3 wurde die praxisorientierte Theorie zu dieser Problematik dargestellt. Zur Ermittlung des „Porositätsgrades“ in der Struktur wurde die Dichtemethode eingesetzt. Diese Methode eignet sich nicht zur Auswertung eines Defektgrades unter 2%. Zu dieser Messung ist eine Methodik der Bildverarbeitung entwickelt worden, bei der die Wirkung von unterschiedlichen Gießsystemen auf die Homogenität des Werkstoffes verifiziert wurde.

Das Schwerkraftkokillengießen ist ein sehr breit eingesetztes Gießverfahren mit dem Vorteil der Herstellung von Gussteilen mit guten mechanischen Eigenschaften (Kap. 4). Zum Gießen von Zylinderköpfen für die in Großserien produzierten Verbrennungsmotoren ist das Schwerkraftkokillengießen ein perspektivisches Gießverfahren. Der Zylinderkopf ist wegen seines thermomechanisch sehr hoch belasteten Brennraumbereichs in der Form so angeordnet, dass dieser durch eine gekühlte Brennraumplatte gebildet wird.

Beim Entwurf des Gießsystems zur Leitung der Schmelze in die Form gibt es eine große Diskrepanz zwischen den Forderungen, einerseits das Metall mit minimalen Temperaturverlusten und damit sehr schnell zu transportieren und andererseits die langsame Formfüllung mit minimalen Turbulenzen zu gewährleisten. In der gesamten Arbeit (bei unterschiedlichen Themenbereichen) wurde an mehreren Beispielen dokumentiert, dass der Strömungsvorgang oder allgemein die Behandlung der Schmelze während des Transports eine große Rolle im gesamten Gießprozess spielt. Der Nachteil des Schwerkraftgießens ist der Kontakt der Atmosphäre mit der Schmelze während der Formfüllung. Damit verbunden ist eine Oxidation und Wasserstoffaufnahme. Der Kopfguss hat gegenüber dem Bodenguss eine ganze Reihe von Vorteilen. Nachteilig ist die unkontrollierte Formhohlraumfüllung (Kap. 6). Durch die Optimierung des Strömungsvorganges kann der Kopfguss zum Gießen von Zylinderköpfen optimal eingesetzt werden.

Zur Optimierung der Strömungsproblematik in einer Gießform bietet sich eine Reihe von Prozesserkennungs Werkzeugen an. Die Visualisierung des Prozesses ist dabei das Grundprinzip der Untersuchungen (Kap. 7). Es wurden Videoaufnahmen an realen Kokillen in einer Gießerei (Einsatz von spez. Glasscheiben) und an einer „gläsernen“ Kokille mit Wasser durchgeführt. Diese Methoden ermöglichen im Vergleich zu anderen Methoden eine relativ einfache und schnelle Analyse. Weiterhin wurde die Auswahl der Methoden durch die technischen Möglichkeiten an der Universität beeinflusst. Die ständige Korrelation der Ergebnisse beider Methoden führte zu neuen Erkenntnissen über die Prozesse bei der Gießsystem- und Formfüllung. Dies hat dazu beigetragen, die Ursachen der undichten Teile zu erkennen. Mit dem Wassermodell konnten mehrere Konstruktionsvarianten und Modifikationen des Gießprozesses ausprobiert werden. Schwerpunkt dabei waren die Gießtumpeloptimierung und die Festlegung der Gießparameter. Obwohl die Strömung der Schmelze mit ihrem mehrphasigen Charakter durch ein anderes Medium kaum ersetzbar ist, eignet sich das Wassermodell zur qualitativen Bewertung von einzelnen Gießsystemvarianten und Gießparametern und ist deshalb ein sehr effektives Untersuchungswerkzeug.

Das Gießen von dichten Teilen mit sehr niedriger Wandstärke fordert eine hervorragende Schmelzequalität. Der Schmelzetransport mit einem Dosiergefäß, das beim Schwerkraftgießen unbedingt notwendig ist, kann zu deutlichen Qualitätseinbußen der Schmelze führen. Im Kap. 3.2.2 wird erläutert, dass die Oxidation ein sehr dynamischer Prozess ist und dass die

Oxidhaut die Schmelze vor der Wasserstoffaufnahme nicht 100%ig schützt. Daraus resultiert die Forderung, die Oxidhaut am Badspiegel geschlossen zu halten und das Mitreißen des schützenden Oxidschlauchs durch den Gießstrahl zu vermeiden. Wie die Videoaufnahmen belegen, oxidiert die Schmelze auch während der Formhohlraumfüllung. Aufgrund der großen Fallhöhe und des konstruktiv bedingt dünnwandigen Wasserraumkernbereiches soll die Formfüllungsfront insbesondere in dieser Zone kompakt ablaufen. Damit wird eine neue Oxidation verhindert und die Wahrscheinlichkeit möglicher Undichtheiten durch kompakte Oxidhäute in Richtung Null gesenkt. In der Arbeit wurden technologische Maßnahmen ausgearbeitet, die die Minderung der Qualität beim Schmelzetransport verhindern: das sind Anforderungen an die Gießroboterprogrammierung und eine neue Gießlöffelgeometrie.

Der Gießprozess wurde an Gießaggregaten detailliert untersucht. Dabei wurden für das ausgewählte Gussteil gravierende Qualitätsunterschiede festgestellt. Durch ein Experiment direkt auf der Gießanlage wurde festgestellt, dass die Abgussart und die Form des Gießtumpels die Ursachen dieser Unterschiede sind. Aufgrund dieser Untersuchungen wurde eine neue Tümpelgeometrie entwickelt.

Der wirtschaftliche Beitrag dieser Arbeit ist in der Praxis leicht messbar. Die eingesetzten technologischen Maßnahmen haben zu einer deutlichen Senkung der Ausschussrate geführt. Bei der Produktion eines derzeit in der Serie gefertigten Zylinderkopfes wurde eine interne Ausschussrate von 0,9 % und externe Ausschussrate von 0,3 % erzielt. Solch eine niedrige interne Ausschussrate ist ein Beweis einer gut beherrschten Technologie im ganzen Herstellungsprozess.

Auf dem Markt sind eine ganze Reihe von gießereitechnisch orientierten Computersimulationsprodukten vorhanden. Für die Untersuchungen wurde die Software „Fluent“ eingesetzt. Das Medium war Wasser, weil die vorhandene Version nur zur Simulation von Newtonschen Flüssigkeiten programmiert wurde. Aufgrund der Erfahrungen aus der Praxis, den Ergebnissen von Untersuchungen an realen Kokillen und an der „gläsernen“ Kokille kann festgestellt werden, dass diese Simulation die realen Prozesse sehr objektiv beschreibt. Eine solche Art der Simulation kann sogar das Wassermodell ersetzen.

Die Ergebnisse der Arbeit sind auf andere anspruchsvolle Gussteile aus Aluminium übertragbar (z. B. Zylinderkurbelgehäuse).

Die vorgelegte Arbeit hat für den Aluminiumschmelzetransport neue Erkenntnisse erbracht und damit weitere Aufgaben eröffnet. Diese sind im folgenden zusammenfassend aufgeführt:

- Nutzung des Simulationsprogrammes Flow3D für weitere Konstruktionsvarianten von Gießsystemen oder Einsatz von anderen gießereitechnischen Programmen für die Kopfgussströmungssimulation mit dem Ziel, diese kritisch zu bewerten,
- Bestimmung günstigster Turbulenzmodelle zur Strömungsmodellierung mittels Wasser, (z. B. Programm Fluent),
- Erprobung von anderen Laufgeometrievarianten in Verbindung mit dem Beruhigungstümpel und horizontal angeordneter Anschnitte (Untersuchungen an realen Werkzeugen mit Glasscheibe und Simulation),
- Detaillierte Fraktografieuntersuchungen in Verbindung mit REM/EDS zur Ursache-findung des Bruches bei höheren Temperaturen an gegossenen Zylinderköpfen,

- Einsatz des Messverfahrens low cycle fatigue zur Festlegung der Ermüdungseigenschaften an gegossenen Teilen und zur Ermittlung der Wirkung von technologischen Parametern, sowie die
- Wirkung der Zusammensetzung des Kreislaufmaterials auf den Inhalt von Oxiden in der Schmelze.

11 Literatur

- [1] Internetadresse <http://www.vda.de>
- [2] Otahal, V.: Manufacture of casting from no-ferrous alloys and their application in individual branches. Slevarenstvi 49 (2001), Nr. 2/3, S. 147 – 156
- [3] Mensa, M.: Aftermarket – nove prilozitosti. Euro 20 (2001), S. 36 – 37
- [4] Röhrig, K.: Der Weltmarkt für Al-Guss. Gießerei-Praxis (1998), Nr. 3, S. 93 – 99
- [5] Kollmann, K.; Niefer, H.; Panten, D.: Perspektiven zur Zukunft der Verbrennungsmotoren: Wohin führt die Weiterentwicklung der Ottomotoren? MTZ - Motortechnische Zeitschrift 59 (1998), Nr.10, S. 630 – 642
- [6] Schommers, J.; Duvinage, F.; Kemmler, R.: Entwicklungsperspektiven von Kraftfahrzeugantrieben. VDI Bericht Nr. 1472 (1999), S. 3 – 32
- [7] Hick, H.; Langmayer, F.: Analyse des Leichtbaupotentials verschiedener Kurbelgehäusewerkstoffe. VDI Bericht Nr. 1472 (1999), S. 35 – 47
- [8] Fischer, A.: Die Substitutionsentwicklung des Aluminiums in Pkw-Motoren. Sonderausgabe von ATZ und MTZ (1999), S. 34 – 37
- [9] Brungs, D.; Mertz, A.: Innovationen bei Gusswerkstoffen – Gussteile aus Aluminium- und Magnesiumwerkstoffen. Gießerei 87 (2000), Nr. 9, S. 34 - 39
- [10] Neyer, D.; Dorenkamp, R.; Rottenkolber, P.: 25 Jahre Dieselmotoren bei Volkswagen. Sonderausgabe der MTZ (2001), S. 12 – 19
- [11] Beste, F.; Schöffmann, W.; Marquard, R.: Leichtbau – eine neue Herausforderung für PKW-Hochleistungsdieselmotoren. Gießerei-Praxis (2000), Nr. 5, S. 203 -207
- [12] Otahal, V.: Castin of drive units from aluminium or ferrous alloys in light automobiles? Slevarenstvi 49 (2001), Nr. 2/3, S. 157 – 162
- [13] Maasen, F.J.; Thomas, S.: Dieselmotorenentwicklung in Aluminium. MTZ - Motortechnische Zeitschrift 62 (2001), Nr. 9, S. 694 - 702
- [14] Caspers, K.H.: Optimale Motorenbauteile durch reale Qualitätsanforderungen. Gießerei-Erfahrungsaustausch (2002), Nr. 5, S. 191 – 197
- [15] Fischer, A.: Aluminium – Der dominierende Werkstoff für moderne Motoren. 4. Euroforum – Fachtagung für die Automobilindustrie in Köln, 25.-26.6.2002
- [16] Honsel, H.D.: Gießen: Vielfalt der Werkstoffe und Verfahren – zur Lage der Gießereiindustrie. Giesserei 89 (2002), Nr. 8, S. 43 – 51
- [17] Automobiltechnologie 2010 – Technologische Veränderungen im Automobil und ihre Konsequenzen für Hersteller, Zuliefer und Ausrüster. Die Hypovereinsbank/Mercer – Studie, Internetadresse <http://icfb.hypovereinsbank.de>, 2001
- [18] Basshuysen, R.; Schäfer, F.: Handbuch Verbrennungsmotoren. Braunschweig/ Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, 1. Aufl., 2002
- [19] Schneider, P.: Kokillen für Leichtmetallguss. Düsseldorf: Giesserei-Verlag, 1986
- [20] Eidenböck, T.; Ratzberger, R.; Stastny, J.; Stütz, W.: Zylinderkopf in Vierventiltechnik für den BMW DI-Dieselmotor. MTZ - Motortechnische Zeitschrift 59 (1998), Nr. 6, S. 368 – 376
- [21] Der neue V6-Vierventilmotor von Volkswagen. MTZ – Motortechnische Zeitschrift 60 (1999), Nr. 11, S. 756 – 765
- [22] Wacker, H. D.: Entwicklung bei Zylinderkopf und Steuerung von Ottomotoren. Motortechnische Zeitschrift 57 (1996), Nr. 6, S. 320 – 325
- [23] Schäfer, F.; Barte S.; Bulla, M.: Geometrische Zusammenhänge an Zylinderköpfen. MTZ - Motortechnische Zeitschrift 58 (1997), Nr. 7/8, S. 384 – 391

- [24] Kollmann, K.; Niefer, H.; Schommers, J.; Panten, D.; Scherenberg, D.: Strategische Technologieplanung in der Ottomotoren-Entwicklung. 7. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motortechnik, 1998
- [25] Jerzembek, M.: Mehr Leistung, geringer Verbrauch. BMW-Magazin, Internetadresse www.bmw.de/aktuell
- [26] Flierl, R.; Hofmann, R.; Landerl, Ch.; Melcher T.; Steyer, H.: Der neue BMW-Vierzylinder-Ottomotor mit Valvetronic. MTZ - Motortechnische Zeitschrift 62 (2001), Nr. 6, S. 450 - 463
- [27] Informationsmaterial der Fa. CD adapco Group
- [28] Persönliche Mitteilung von Dr. Hieber, Institut für Maschinenmesstechnik und Kolbenmaschinen der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- [29] Pischinger, S.; Schwaderlapp, M.; Maassen, F.: CAE in der Produktentstehung - Zylinderkopfentwicklung. Wiesbaden: 5. Automobiltechnische Konferenz, 17.-18.5.2001
- [30] Patent-Nr. DE 3605519
- [31] Becker, N. – Lippert, E. – Szengel, R.: Neue Ottomotoren für den VW Polo. MTZ – Motortechnische Zeitschrift (1996), Nr. 9, S. 478 – 490
- [32] Neukirchner, H. – Kromer, B.: Leichtmetallkurbelgehäuse mit Grauguss-Stützstruktur. VDI Bericht Nr. 1472 (1999), S. 49 – 83
- [33] Dieterle, U. – Junk, H. – Blum, D. – Lühr, H. – Wagner, T. – Schwaderlapp, M.: Zylinderkurbelgehäuse aus Gusseisen – ein kostengünstiges Konzept für Pkw-Motorblöcke. MTZ – Motortechnische Zeitschrift (1997), Nr. 12, S. 770 – 774
- [34] Feikus, F.J.: Optimierung von Aluminium-Silicium-Gusslegierungen für Zylinderköpfe. Gießerei-Praxis (1999), Nr.2, S. 50 – 57
- [35] Moderne Zylinderkopfkonstruktion und aktuelle Gießtechnik. Aluminium 64 (1988), Nr. 5, S. 476
- [36] Patent-Nr. DE 19925666
- [37] Koreny, R.; Havrlant, S.: Možnosti zvýšení kvality materiálu hlav valcu vzduchem chlazených naftových motorů. Slevarenství 28 (1980), Nr. 8, S. 328 – 330
- [38] Koreny, R.: Mechanické a unavové vlastnosti vybraných slevarenských slitin hliníku. Slevarenství 38 (1990), Nr. 5, S. 178 - 183
- [39] Ambos, E.; Bähr, R.; Scheel, B.: Vom Wert eines Experiments – ein Beitrag zur bevorstehenden Hochschulreform. Giesserei 85 (1998), Nr. 5, S. 29 – 34
- [40] Feiste, K.L.; Reimche, W.; Stegemann, D.; Köhler, M.; Mielke, A.; Windelberg, D.; Haferkamp, H.; Bach, F.W.; Viets, R.: Prozessintegrierte Qualitätsprüfung beim Leichtmetallkokillenguss. Gießerei-Praxis (1997), Nr. 5, S. 108 – 114
- [41] Jeschke, K.; Schömig, D.; Westkämper E.: Null-Fehler durch prozesskettenübergreifende Qualitätslenkung. QZ - Qualität und Zuverlässigkeit 40 (1995), Nr. 1, S. 56 - 60
- [42] Caspers, K.H.: Durch beherrschte Schmelztechnik zur reproduzierbaren Qualität von Gussteilen. Giesserei 84 (1997), Nr. 1, S. 11 – 16
- [43] Vogel, W.: Ein Beitrag zur Metallurgie des Aluminiums. Giesserei 84 (1997), Nr. 22, S. 17 – 20
- [44] Jaunich, H.: Entwicklung neuartiger Technologien beim Leichtmetallsandguss zur Qualitätssicherung in der industriellen Fertigung. Hannover: Sonderforschungsbericht Nr. 326: Prozessintegrierte Qualitätsprüfung mit Qualitätssystem für metallische Bauteile des Maschinenbaus, Universität Hannover, 2000
- [45] Hielscher, U.: Ursachen schlechter Qualität von Schmelzen, die zu Gussfehlern führen. Gießerei-Erfahrungsaustausch (2001), Nr. 1, S. 14 - 17

- [46] La Orchan, W.; Mulazimoglu, M.H.; Gruzleski, J.E.: Quantification of the Reduced Pressure Test. Transactions of the American Foundrymen's Society 99 (1991), S. 653 – 659
- [47] Caspers, K.H.: Optimale Motorenbauteile durch reale Qualitätsanforderungen. Gießerei-Erfahrungsaustausch (2002), Nr. 5, S. 191 - 197
- [48] Caspers, K.H.: Die Komplexitätsbeherrschung im Gießereibetrieb als Voraussetzung für Qualitätssteigerung und Kostensenkung. Gießerei-Erfahrungsaustausch (1994), Nr. 4, S. 129 - 137
- [49] Hasse, S.: Giesserei Lexikon. Berlin: Schiele & Schön, 18. Aufl., 2001
- [50] Caspers, K.H.: Das Luftstrom-Press-Formverfahren im Spiegel der Produktionsüberwachung. Giesserei 87 (2000), Nr. 5, S. 52 – 57
- [51] Lutze, P.; Ruge, J.: Wasserstoff in Aluminium und seinen Legierungen. Metall 44 (1990), S. 741 - 748
- [52] Klinkenberg, F.J.: Wasserstoff und Porosität in Aluminium. Aachen: RWTH Aachen, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften, Dissertation, 1998
- [53] Chomickij, A.A.; Borisov, G.P.: Raspredelenie gazov v litom metalle. Litejnoe Proizvodstvo (1996), Nr. 7, S. 10 – 12
- [54] Klinkenberg, F.J.; Engler, S.: Gasgehalt und Porosität bei dickwandigem Aluminiumguss. Giesserei 85 (1998), Nr. 3, S. 38 – 44
- [55] Chen, X.G.; Engler, S.: Blasenbildung und Porenmorphologie in erstarrenden Aluminiumgussstücken. Metall 48 (1994), S. 276 – 283
- [56] Chen, X.G.; Engler, S.: Einfluss des Wasserstoffgehaltes auf die Porosität von Aluminium-Silicium- und Aluminium-Magnesium-Legierungen. Giesserei 78 (1991), Nr. 19, S. 679 – 684
- [57] Ptacek, J.: Souvislost mezi obsahem vodiku a objemem vnitřních stáženin a poru u slevarenské slitiny hliníku CSN 42 4384. Slevarenství 37 (1989), Nr. 10, S. 433 - 434
- [58] Anson, J.P.; Gruzleski, J.E.; Drew, R.A.L.; Stucky, M.; Richard, M.: Mesure de la germination et de la croissance. Fonderie – Fondeur d'aujourd'hui 191 (2000), Nr. 1, S. 8 - 21
- [59] Mohanty, P.S.; Samuel, F.H.; Gruzleski, J.E.: Experimental Study on Pore Nucleation by Inclusions in Aluminium Castings. Transactions of the American Foundrymen's Society 103 (1995), S. 555 – 564
- [60] Turkdogan, E.T.: Physical Chemistry of High Temperature Technology. London: Academic Press, 1980
- [61] Fuocco, R.; Correa, E.R.; Bastos, M.A.; Escudero, L.S.: Characterization of Some Types of Oxides Inclusions in Aluminium Alloy Castings. St. Louis: 103. AFS-Casting Congress, 1999
- [62] Chen, X.G.; Gruzleski, J.E.: Influence of melt cleanliness on pore formation in aluminium-silicon alloys. Cast Metals 9 (1996), Nr. 1, S. 17 – 26
- [63] Büchen, W.: Oxidation und Wasserstoffaufnahme von Aluminiumschmelzen – bei Formguss während der Schmelzbewegungen möglichst vermeiden! Giesserei 75 (1998), Nr. 17, S. 491 – 498
- [64] Samuel, A.M.; Samuel, F.H.: Porosity Factor in Quality Aluminium Castings. Transactions of the American Foundrymen's Society (1993), S. 657 – 666
- [65] Samuel, A.M.; Samuel, F.H.; Boudreault, G.: Microstructural Observations of Porosity in A319.2 Alloy: Effect of Mold Type & Cooling Rate. St. Louis: 103. AFS-Casting Congress, 1999

- [66] Stroppe, H.: Einfluss der Porosität auf die mechanischen Eigenschaften von Gusslegierungen. *Giessereiforschung* 52 (2000), Nr. 2, S. 58 - 60
- [67] Schindelbacher, G.: Einfluss unterschiedlicher Porosität auf die mechanischen Eigenschaften der Legierung GD- AlSi9Cu3 . *Gießerei-Praxis* (1993), Nr. 19, S. 381 – 392
- [68] Stroppe, H.: Einfluss von Erstarrungsparametern und Gefügemerkmalen auf den Qualitätsindex von Aluminiumguss. Demnächst in *Giessereiforschung*.
- [69] Gundlach, R.B.; Hetke, A.; Valtierra, S.; Mojica, J.F.; Ross, B: Temperaturwechselbeständigkeit von untereutektischen Aluminium-Silicium-Gusslegierungen. *Gießerei-Praxis* (1995), Nr. 11/12, S. 209 - 226
- [70] Boileau, J.; Allison, J.; Collins P.: The Effect of Solidification Time and Heat Treatment on the Tensile and Fatigue Properties of a Cast 319 Aluminium Alloy. Orlando: International AFS Conference Molten Aluminium Processing, 1998
- [71] Brosnan, S.; Shivkumar, S.: Zugfestigkeitseigenschaften und Bruchmechanismen von Gussstücken aus G-AlSi7Mg bei erhöhten Temperaturen. *Gießerei-Praxis* (1998), Nr. 3, S. 112 – 123
- [72] Nyahumwa, C.; Green, N.R.; Campbell, J.: Effect of Mold-Filling Turbulence on Fatigue Properties of Cast Aluminium Alloys. *Transactions of the American Foundrymen's Society* (1998), S. 215 – 223
- [73] Grigerova, T.; Vilcko, J.: Uplatnenie teorie prudenia taveniny pri rieseni vtokovych sustav odliatkov zo slitin na baze hlinika. *Slevarenstvi* 30 (1982), Nr. 7, S. 273 - 278
- [74] Wang, O.G.; Apelian, D.; Griffiths, J.R.: Microstructural Effects on the Fatigue Properties of Aluminium Castings. New South Wales: Proceedings from Materails Solutions Conference on Aluminium Casting Technology, 1998
- [75] Wukowich, N.; Metevelis, G.: Gating: The Foundryman's Dilemma, or Fifty Years of Data and Still Asking "How?". *Transactions of the American Foundrymen's Society* (1989), S. 285 – 302
- [76] Arbenz, H.: Qualitätsbeschreibung von Aluminium-Gussstücken anhand von Gefügemerkmalen. *Giesserei* 66 (1979), Nr. 19, S. 702 – 711
- [77] Anson, J.P.; Gruzleski, J.E.: A Quantitative Evaluation of the Effect of Hydrogen Content on the Relative Amounts of Shrinkage & Gas Microporosity in a Cast Al-7% Si Foundry Alloy. St. Louis: 103. AFS-Casting Congress, 1999
- [78] Volumendefizite von Gussstücken aus Nichteisenmetallen. *VDG-Merkblatt P 201*, 2002
- [79] Sonsino, C.M.; Dietrich, K.: Einfluss der Porosität auf das Schwingfestigkeitsverhalten von Aluminium-Gusswerkstoffen. Darmstadt: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit, AiF – Forschungsvorhaben Nr. 5899, 1990
- [80] Wendt, H.; Süllow, F.; Eisenberg, S.: Methoden zur Porositätsprüfung an Gussteilen– Beurteilung unterschiedlicher Verfahren. *Giesserei* 89 (2002), Nr. 9, S. 46 - 50
- [81] Lukac, I.; Michna, S.: Strukturni vady u slitin na bazi Al-Si a jejich identifikace aplikaci fraktograficke, EDX a metalograficke analyzy. *Slevarenstvi* 48 (2000), Nr. 11/12, S. 579 – 585
- [82] Reznicek, P.; Holmanova, M.: Prispivek k hodnoceni slevarenskych vad hlinikovych slevarenskych slitin rastrovacim elektronovym mikroskopem. *Slevarenstvi* 34 (1986), Nr. 3, S. 108 - 112
- [83] Dighe, M.D.; Jiang, X.G.; Tewari, A.; Rahardjo, A.S.B.; Gokhale, A.M.: Quantitative Microstructural Analysis of Microporosity in Cast A356 Aluminium Alloy. *Transactions of the American Foundrymen's Society* (1998), S. 181 – 190

- [84] Maslov, K.I.; Kundu, T.; Lobkis, O.I.: A new technique for distinguishing internal voids from solid inclusions. Seattle: Proceedings of the Twenty-Second Symposium: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Band 15A, 30.7.-4.8.1995
- [85] Stroppe, H.; Vovk, V.; Taran, V.: Methode zur getrennten Bestimmung des Gasporen- und Lunkeranteils in Druckgussteilen. Giessereiforschung 52 (2000), Nr. 4, S. 154 - 156
- [86] Brevick, J.R.; Cheng, P.S.: Ermittlung der Qualität von Vakuum-Druckgussteilen. Giesserei-Praxis XX (1997), Nr. 9/10, S. 219 - 222
- [87] Matthes, E.; Ferraz, T.: Ingate Porosity in Al/Si Castings. New Delhi: 54th International Foundry Congress, 1987
- [88] Jürgens, H. H.: Neue Entwicklungen bei der Herstellung hochwertiger Gussteile aus Aluminiumlegierungen. Giesserei 73 (1986), Nr. 21, S. 607 - 609
- [89] Smith, R.A. – Wilkins, P.S.A.: Niederdruck-Sandguss – Erfahrungen mit einem neuen Prozess. Giesserei-Praxis (1987), Nr.17, S. 247 – 252
- [90] Weiss, F.; Fuchs, H.A.: Niederdruckgießen von Zylinderköpfen und Zylinderblöcken. Giesserei-Praxis XX (1990), Nr. 8, S. 129 – 137
- [91] Arndt, R. – Kusebauch, K. – Rösch, R. – Stenzel, M.: Das Aluminium-Kurbelgehäuse der Audi-Vierzylindermotoren mit 1,6 und 1,8 l Hubraum. MTZ – Motortechnische Zeitschrift 10 (1997), S. 600 – 606
- [92] Michels, W.: Verfahrensübersicht zur Herstellung von Zylinderköpfen. Düsseldorf: Institut für Gießereitechnik, IFG-Bericht Nr. 99-155, 1999
- [93] Popov, A.: Erfahrungen bei der Herstellung von Motorguss nach dem Kernpaketverfahren. Giesserei-Erfahrungsaustausch (2000), Nr. 8, S. 393 – 399
- [94] Sobczyk, M.: Vergleich alternativer Prototyping-Prozessketten. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung, Diplomarbeit, 2001
- [95] Gosch, R.; Stika, P.: Innovatives Gießverfahren für hochwertige Gussstücke. Gießerei-Rundschau 48 (2001), Nr. 5/6, S. 10 - 14
- [96] Temmesfeld, A.; Michalik, U.: Konstruktion und gießtechnische Entwicklung eines hochbeanspruchten Sechszylinderkopfes in Lost Foam. Magdeburg: VDF-Tagung, Gießtechnik im Motorenbau – Anforderungen der Automobilindustrie, 1. - 2.2. 2001
- [97] Gießverfahren für Aluminium-Motorblöcke und –Zylinderköpfe. Aluminium 77 (2001), Nr. 4, S. 247 - 250
- [98] Internetadresse <http://www.vaw.de>
- [99] Grzincic, M.: Vyroba velmi narocnych odlitku z hlinikovych slitin pro automobilovy prumysl – hlav valcu. Slévárnství 48 (2000), Nr. 9, S. 432 – 439
- [100] Lessiter, M.J.: Zur heutigen Technologie der Gussherstellung nach dem Lost-foam-Verfahren in den USA. Giesserei 85 (1998), Nr. 8, S. 65 – 70.
- [101] Gruneberg, N.; Escherle, E.; Sturm, C.: Simulation as an integral tool for process design and optimization for Aluminium cylinder head manufacturing. St. Louis: 103. AFS-Casting Congress, 1999
- [102] Patent-Nr. DE 9421585
- [103] Patent-Nr. DE 4318252
- [104] Lambert, G.R.: Gießen von Fahrzeugkomponenten aus Aluminium auf kastengebundenen Hochleistungs-Formanlagen. Giesserei 85 (1998), Nr. 8, S. 57 – 62.
- [105] Formanlage mit aktiver Speisung für Aluminiumgussteile. Giesserei 84 (1997), Nr. 21, S. 47 – 48

- [106] Haddenhorst, H.; Kiebel, A.: AGSC: Alcoa Green Sand Casting, Hochproduktiver Sandguss mit bentonitgebundenen Formen. Giesserei-Praxis (2001), Nr. 1, S. 23 - 26
- [107] Peters, D. M. – Rodgers, R. C.: INTERMET's big push into aluminium. Foundry management & technology (1993), Nr. 6, S. 34 – 38.
- [108] Patent-Nr. DE 3512726
- [109] Patent-Nr. DE 3706929
- [110] Patent-Nr. DE 19531551
- [111] Patent-Nr. DE 3925373
- [112] Patent-Nr. DE 3024311
- [113] Nielsen, F.: Gieß- und Anschnittechnik. Düsseldorf: Giesserei-Verlag, 1987
- [114] Rabinovic, B.V.; Mai, R.; Drossel, G.: Grundlagen der Gieß- und Speisetechnik für Sandformguss. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1989
- [115] Koreny, R.; Fiala, J.; Tosenovsky, J.: Matematickostatisticke hodnoceni parametru vtokovych soustav u odlitku ze slitin hlinik – kremik. Slevarenstvi 30 (1982), Nr. 9, S. 381 – 385
- [116] Guyon, E.; Hulin, J.-P.; Petit, L.: Hydrodynamik. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, 1997
- [117] Gestern, K.: Einführung in die Strömungsmechanik. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, 1997
- [118] Rezvani, M.; Yang, X.; Campbell, J.: The Effect of Ingate Design on the Strength & reliability of Al Castings. St. Louis: 103. AFS-Casting Congress, 1999
- [119] Runyoro, J.; Boutorabi, S.M.A.; Campbell, J.: Critical Gate Velocities for Film-Forming Casting Alloys: A Basis for Process Specification. Transactions of the American Foundrymen's Society (1992), S. 225 – 234
- [120] Spasski, A.G.: Grundlagen des Giessereibetriebes. Leipzig: Fachbuchverlag, 1955
- [121] Altenpohl, D.: Aluminium von Innen. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 5. Aufl., 1994
- [122] Barinova, D.; Baloun, A.: Vyuziti pocitacove simulace liti pomoci programu MAGMA-soft ve slevarne hliniku, SKODA AUTO, a.s. Slevarenstvi 48 (2000), Nr. 4, S. 211 – 214
- [123] Rabinowic, B.V.: Anschnittsysteme – Teil 1. Gießereitechnik 20 (1974), Nr. 1, S. 8 – 13
- [124] Rabinowic, B.V.: Anschnittsysteme – Teil 2. Gießereitechnik 20 (1974), Nr. 2, S. 43 – 48
- [125] Holzmüller, A.; Kucharcik, L.: Atlas zur Anschnitt- und Speisertechnik für Gusseisen. Düsseldorf: Giesserei-Verlag, 2. Aufl., 1975
- [126] Mai, R.; Neumann, W.; Piaskowski, J.; Velinsky, J.: Gußeisen mit Kugelgraphit – Anschnitt und Speisetechnik. Leipzig: Staatliches Gussbüro, 1987
- [127] Jansen, B.; Kätzlitz, W.; Kucharcik, L.; Wenk, L.: Anschnitt- und Speisertechnik für das Sand- und Kokillengießverfahren bei Aluminium- und Kupferlegierungen. Düsseldorf: Verein Deutscher Gießereifachleute, 1992
- [128] Karsay, S.I.: Gusseisen mit Kugelgraphit III – Anschnitt und Speisertechnik. Montreal: QIT-Fer et Titane Inc., 1981
- [129] Brandenberger, U.: Anschnitt- und Speisertechnik – Grundlagen aus der Sicht der Praxis – Teil 2. Giesserei 85 (1998) Nr. 6 S. 109 - 111
- [130] Anderson, J.; Gerhardt, P.; Forrest, R.; Rodter, H.: Sphäroguss – Gießsystem und Speisertechnik. Montreal: QIT – Fer et Titane Inc.

- [131] Campbell, J.; Prodhan, A.; Carpenter, M.: Die Wirkung von Anschnittgestaltung und Filtration auf die mechanischen Eigenschaften der Gusslegierung AlSi7Mg0,4. Düsseldorf: CIATF Technical Forum, 1999
- [132] Koreny, R.: Odlevani odlitku ze slitin hliniku do netrvalych forem. Slevarenstvi 47 (1999), Nr. 1, S. 21 – 26
- [133] Strömungsphänomene von flüssigem Aluminium bei der Formfüllung. Giesserei-Erfahrungsaustausch (2000), Nr. 1, S. 13 - 20
- [134] Wesp, S.; Kahn, F.: Eine automatisch arbeitende 12-Stationen-Karussell-Kokillen-Gießanlage für Aluminium-Zylinderköpfe. Giesserei 69 (1982), Nr. 12, S. 331 – 335
- [135] Taran, V.: Entwicklung einer Technologie zur Fertigung eines Aluminium-Zylinderkopfes aus Gradientenguss. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung, Dissertation, 2001
- [136] Patent-Nr. DE 69223178
- [137] Patent-Nr. DE 19720183
- [138] Meskov, V.P.: Konstrukcii litnikovych cas i voronok dlja form s vertikalnym razjemom. Litejnoe proizvodstvo (1998), Nr. 2/3, S. 10 - 12
- [139] Askeland, D.R.; Patel, D.S.; Wolf, R.V.: Wirkung der Anschnittgestaltung auf die Fehlerfreiheit von Kokillenguss aus Aluminiumlegierungen. Gießerei-Praxis (1976), Nr. 18, S. 263 – 267
- [140] Sirrell, B.; Campbell, J.: Real Time XRay Radiography of mould Filling. Blackpool: The Institute of British Foundryman, 92nd Annual Conference „Castcon“, 15.-16.6.1995
- [141] Patent-Nr. DE 19720184
- [142] Vogel, W.: Ein Beitrag zur Metallurgie des Aluminiums. Giesserei 84 (1997), Nr. 22, S. 17 – 20
- [143] Campbell, J.: Castings. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991
- [144] Jong, S.H.; Hwang, W.S.: Three-Dimensional Mold Filling Simulation for Casting and Its Experimental Verification. Transactions of the American Foundrymen's Society (1991), S. 117 – 124
- [145] Krenek, M.; Lubojacky, M.; Ivanov, I.: Porovnani tri typu vtokovych soustav metodou primeho sledovani zaplnovani formy pomoci mikropocitace. Slevarenstvi 37 (1989), Nr. 7, S. 278 - 283
- [146] Mutwil, J.; Buchholz, A.; Engler, S.: Strömungs- und Erstarrungsvorgänge beim Einfließen einer eutektischen Aluminium-Silizium-Legierung in eine Kokille. Giessereiforschung 49 (1997), Nr. 3, S. 124 - 133
- [147] The Casting Filling Process – The Basic Principles of Fluid Dynamics (Part I). Foundryman 6 (2001), S. 203 – 213
- [148] Xu, Z.A; Mampaey, F.: A Study of mould filling for castings. The Hague: 60. Giesserei Weltkongress, 26.9.-1.10.1993
- [149] Jong, S.H.; Hwang, W.S.: Measurement of Flow Pattern for the Mold Filling of Castings. Transactions of the American Foundrymen's Society (1991), S. 69 – 75
- [150] Ingerslev, P., Andersen, S.T.: Flow Analysis of Mould Filling High Speed Motion Pictures of the Metal, Watermodelling and Numerical Calculations. New Delhi: 54th International Foundry Congress, 1987
- [151] Windelberg, D.; Haferkamp, H.; Lange, R.; Weber, J.; Duhm, R.; Reichert, C.; Reimche, W.; Stegemann, D.: Prozessintegrierte Qualitätsprüfung beim Leichtmetallkokillen

- lenguss. Hannover: Universität Hannover, Sonderforschungsbericht Nr. 326: Prozess-integrierte Qualitätsprüfung mit Qualitätssystem für metallische Bauteile des Maschinenbaus, 2000
- [152] Krenek, M.: Navrhovani vtokovych soustav pomoci metody modelovani – zpusob ziskani vyssi kvality odlitku. Slevarenstvi 33 (1985), Nr. 9, S. 378 – 381
- [153] Nguyen, T.; Carrig, J.: Water Analogue Studies of Gravity Tilt Casting Copper Alloy Components. Transactions of the American Foundrymen's Society (1986), S. 519 – 528
- [154] Stoehr, R.A.: Fluid Flow Modeling Aids Mold Design, Filling Control. Modern Casting (1989), Nr. 3
- [155] Webster, P.D.: The Control of inclusions in sand casting. Foundry Trade Journal 165 (1991), Nr. 9, S. 576 – 577
- [156] Bradley, F.J.; Hoopes, J.A.; Kannan, S.; Balakrishna, J.V.; Heinemann, S.: A Hydraulics-Based Model of Fluid Flow in Horizontal Gating Systems. Transactions of the American Foundrymen's Society (1992), S. 917 – 923
- [157] Xue, X.; Hansen, S.F.; Hansen, P.N.: Water Analog Study of Effects of Gating Designs on Inclusion Separation and Mold Filling Control. Transactions of the American Foundrymen's Society (1993), S. 199 – 209
- [158] Scholz, K.; Klein, F.: Erfassung der Formfüllung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera an Formen industriell gefertigter Druckgussteile. Aalen: 15. Aalener Giessereisymposium, 1994
- [159] Kim, S.B.; Yeom, K.D.; Hong, C.P.: Simulation of mould filling sequences in gravity tilt-pour casting. Int. J. Cast Metals Res. (1997), Nr. 10, S. 49 – 56
- [160] Kuo, J.; Hwang, W.: Flow Pattern Simulation in Shot Sleeve During Injection of Casting. American Foundrymen's Society, Atlanta: 102. AFS-Casting Congress, 1998
- [161] Eigenfeld, K.; Järke, P.: Metallurgische und verfahrensbedingte Aspekte bei der Fertigung hochwertiger Aluminium-Gussstücke. Aluminium 64 (1988), Nr. 1, S. 60 – 68
- [162] Rautenbach, A.: Strömungsversuche Zylinderkopfkokille. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung, Diplomarbeit, 1998
- [163] Wukovich, N.; Metewelis, G.: Gating: The Foundryman's Dilemma, or Fifty Years of Data and Still Asking „How?“. San Antonio: 93. AFS-Casting Congress, 1989
- [164] Koreny, R.; Krenek, M.: Zviditelneni proudeni pri modelovani – metoda studia pohybu tavenin ve slevarenske forme. Slevarenstvi 30 (1982), Nr. 8, S. 332 – 336
- [165] Griebel, M.; Dornseifer, T.; Neunhoffer, T.: Numerische Simulation in der Strömungsmechanik. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, 1995
- [166] Hamel, G.: Mechanik der Kontinua. Stuttgart: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1956
- [167] Informationsmaterial der Fa. Fluent Inc.
- [168] Datta, J.: Aluminium-Werkstoff Datenblätter. Düsseldorf: Aluminium Verlag, 1998
- [169] Schröder, A.: Strömung und Gleitung, Erstarrung und Haftung Bingham'scher Überzugstoffe an geneigten Formflächen. Giesserei-Rundschau 44 (1997), Nr. 9/10, S. 3 – 9
- [170] Bertman, V.; Poliakov, S.; Hartmann, R.: Simulation der Gießformfüllung unter Berücksichtigung des Gasdruckes. Giessereiforschung 52 (2000), Nr. 3, S. 95 – 99

- [171] Heckel, T.; Klein, F.: Strömungstechnische Optimierung von Gießbehälter und Gießsystem durch Simulation, Gießerei-Praxis (2000), Nr. 7, S. 295 - 299
- [172] Abdullah, S.; Gethin, D.T.; Bell, F.: An experimental investigation of the filling of a thin section and simulation by the finite element method. Proc. Instn. Mech. Engrs. 212 B (1998), S. 279 - 297
- [173] Kovarik, J.; Majer, J.: Pocitacova simulace liti – prostredok optimalizace vtokovych soustav. Slevarenstvi 43 (1995), Nr. 5, S. 326 - 328
- [174] Floß, D.; Brennecke, U.: Analyse des Füllvorganges einer automatischen Füllanlage und Vergleich der Ergebnisse mit den Ergebnissen beim manuellen Gießen. Magdeburg: Metop GmbH, Forschungsbericht, 1999
- [175] Patent-Nr. DE 20120898
- [176] Bähr, R.; Grzincic, M.; Hornig-Vorbau, B.; Mnich, F.: Entwicklungspotentiale bei der Fertigung hochbeanspruchter Bauteile aus Aluminiumlegierungen. Magdeburg: Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung, Magdeburger Produktionstechnisches Kolloquium – Die Wissensintensive Produktion, 5.5.1999
- [177] Patent-Nr. DE 10245439.6
- [178] Informationsmaterial der Fa. Hydro VAW
- [179] Datta, N.; Sanfor, P.: The production of high yield, high quality aluminium cylinder head castings using semi-permanent mold. St. Louis: 3rd International Permanent Mold Casting of Aluminium Conference, 1995
- [180] Persönliche Information Herrn Krebs von Mai 1999
- [181] Nova, I.: Simulacni programy tuhnuti a chladnuti odlitku. Brno: Ceska slevarenska spolecnost, "Slevarenska rocenka 2002"

12 Anlage

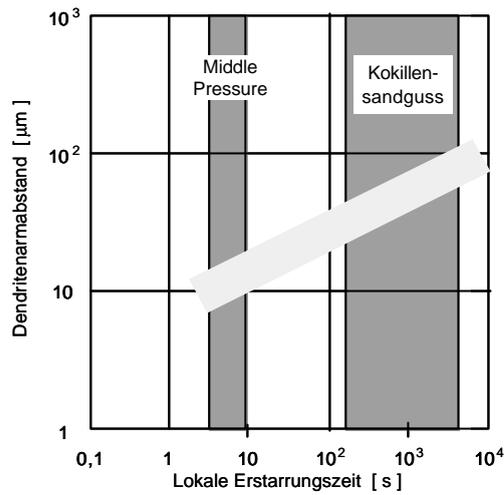


Bild 1 Abhängigkeit des Dendritenarmabstandes von der Erstarrungsgeschwindigkeit, Werkstoff AlSi9Cu3 [88]

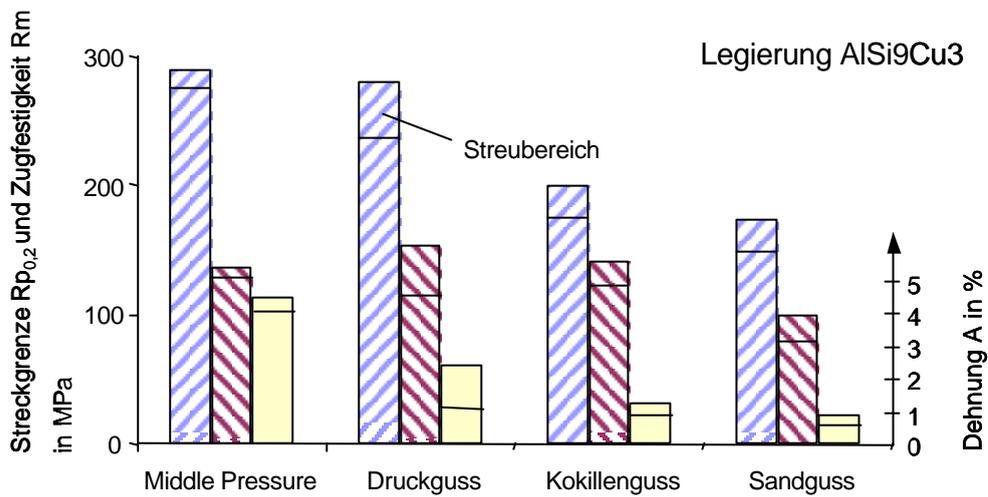


Bild 2 Vergleich mit verschiedenen Gießverfahren erzielten Festigkeitseigenschaften; Verdeutlichung der Unterschiede bei den erzielten Streubreiten [88]

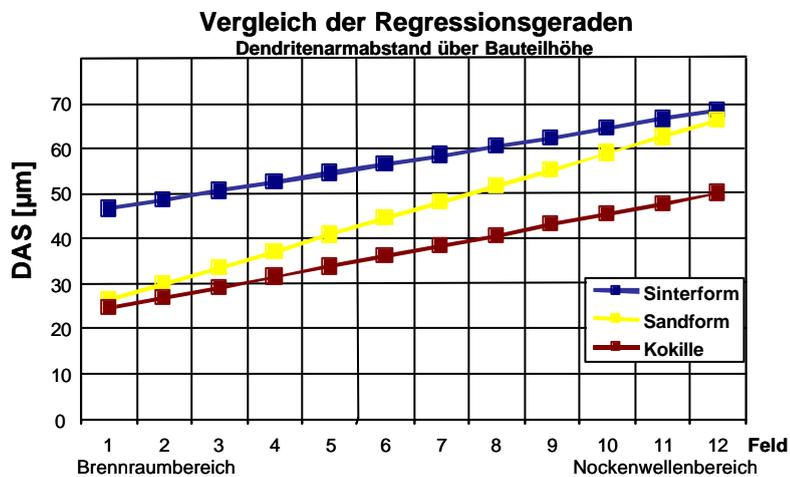


Bild 3 DAS-Verläufe in Abhängigkeit vom Herstellungsverfahren [94]

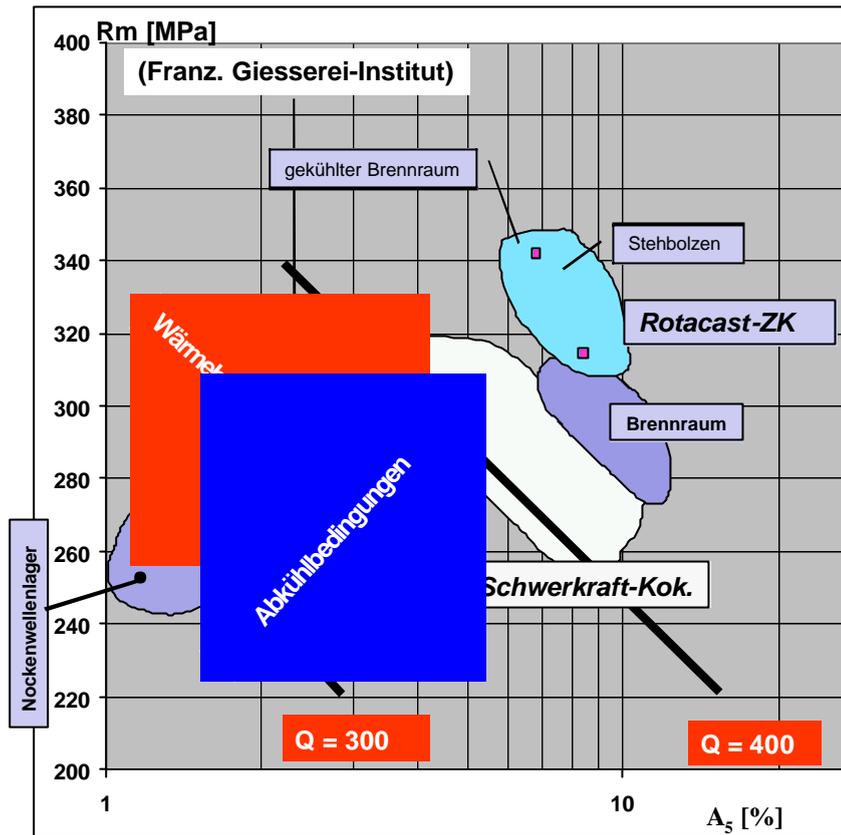


Bild 4 Qualitätsindex für mit konventioneller Technologie gegossene Zylinderköpfe und für Rotacast-Zylinderköpfe [95]

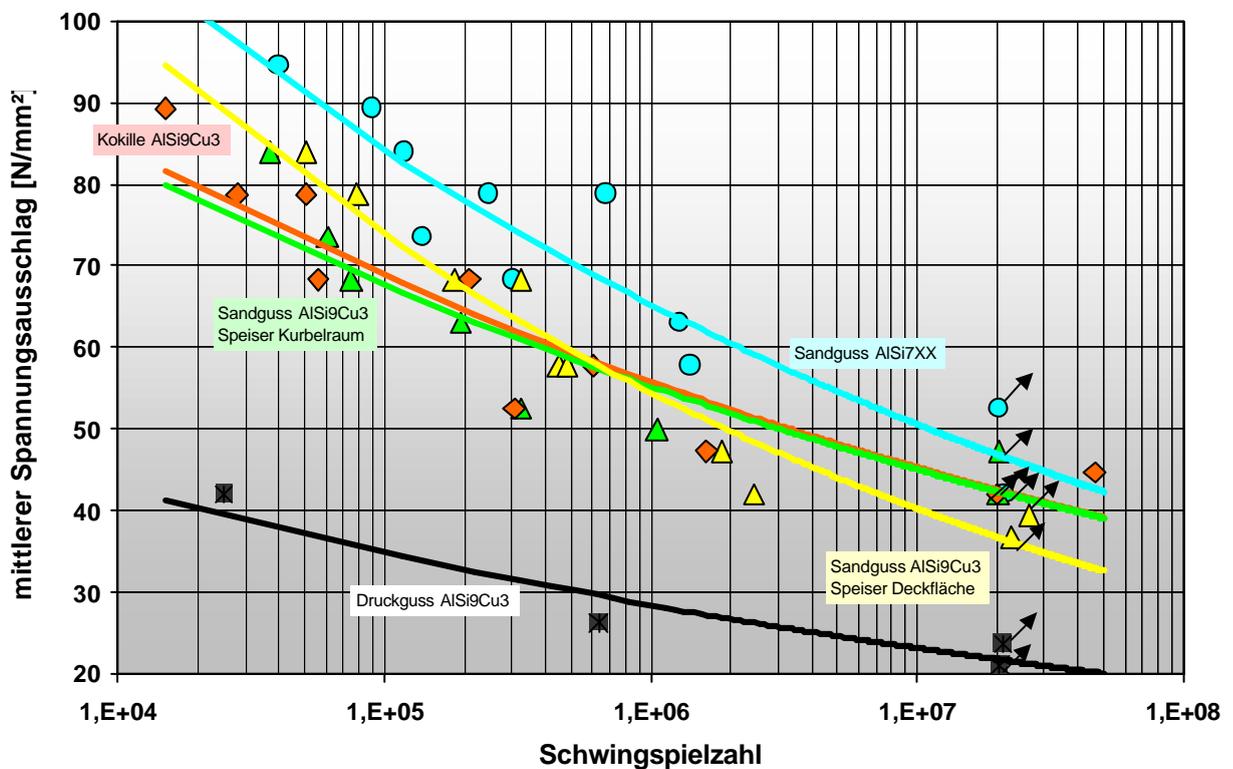


Bild 5 Dauerschwingfestigkeit ($R=0,05$; $T=150^\circ\text{C}$; 50 Hz) an Werkstoffproben aus Realgussteilen, gegossenen durch unterschiedliche Gießverfahren [178]

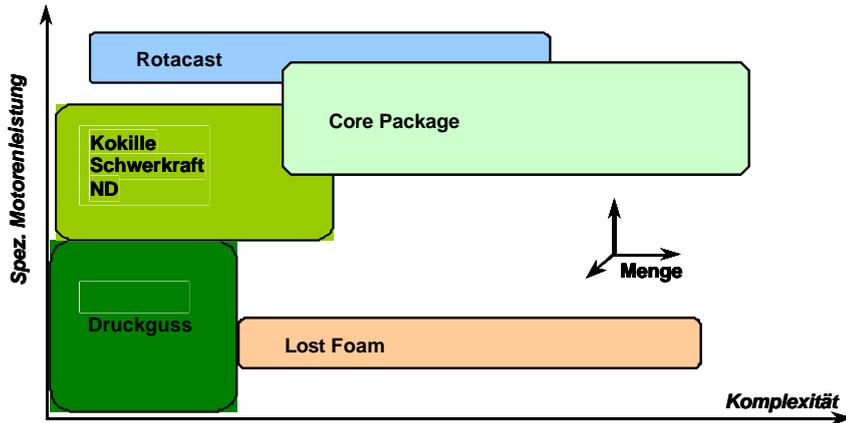


Bild 6 Einteilung von Gießverfahren nach VAW [178]

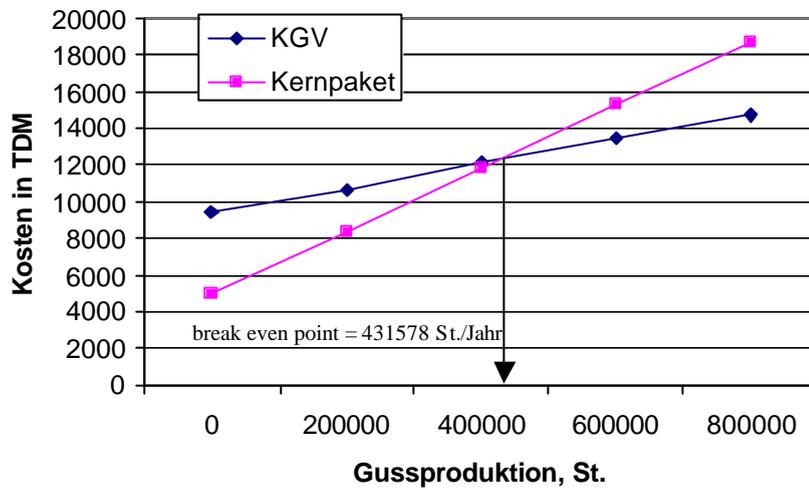


Bild 7 Break-even-point-Bestimmung beim Kostenvergleich zwischen Kokillengieß- (KGV), und Kernpaketverfahren [93]

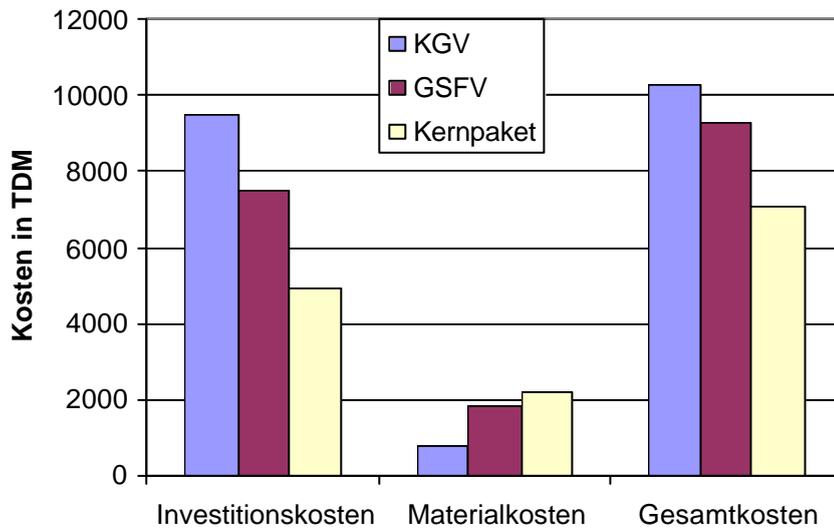


Bild 8 Kostenvergleich zwischen dem Kokillenschwerkraftgießen- (KGV), dem Grün-sand- (GSFV) und dem Kernpaket (Cosworth)-Verfahren auf der Basis einer Jahresproduktion von 130.000 Aluminiummotorblöcken [93]

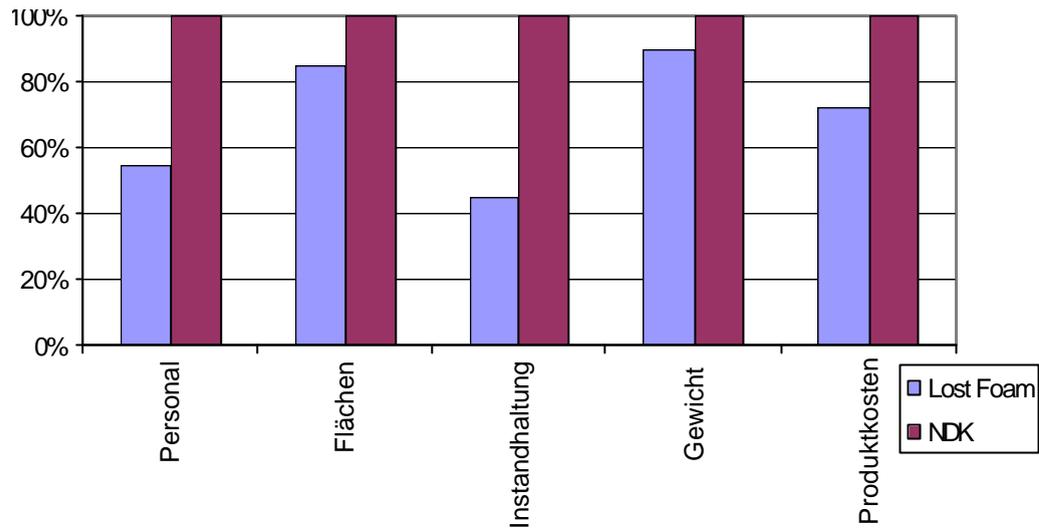


Bild 9 Kostenvergleich Lost-foam und Niederdruckguss beim Gießen von Zylinderköpfen [96]

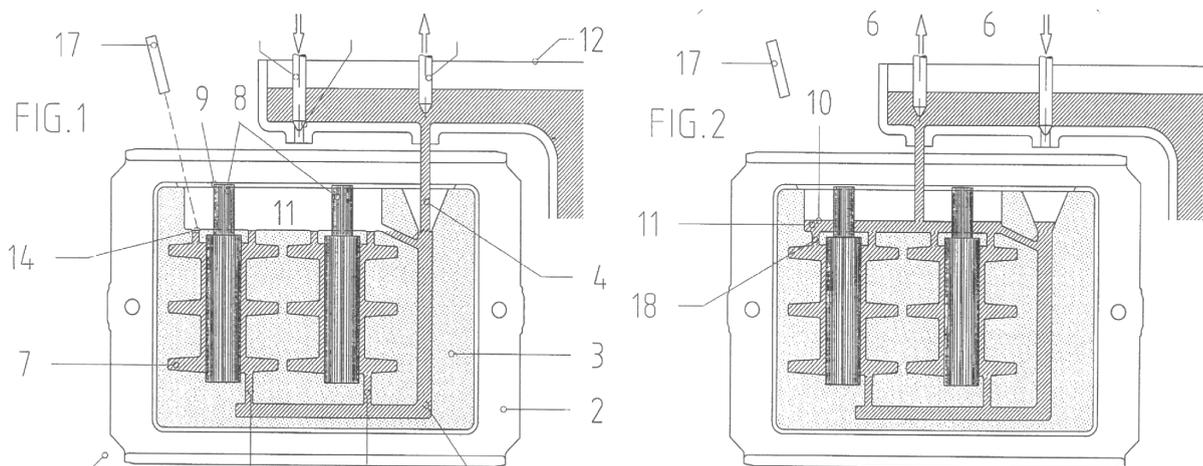


Bild 10 Verbindung des Etagegießsystems mit getrennter Formhohlraumfüllung und nachfolgender Speiserfüllung [137]

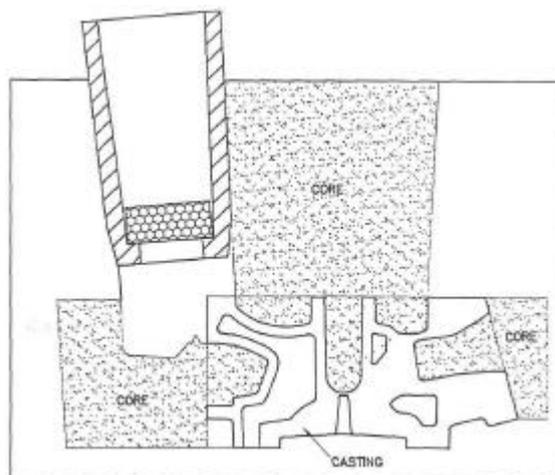


Bild 11 Punktueller Kopfguss zum Gießen von Zylinderköpfen entwickelt von Foseco [179]

Tab 1 Mechanische Eigenschaften der Al-Gusslegierungen für die Zylinderköpfe [38,168]

Legierung	Gießverfahren			Dehngrenze $R_{p0,2}$ [MPa] min.						Zugfestigkeit R_m [MPa] min.					
	S	N	D	Sandguss			Kokillenguss			Sandguss			Kokillenguss		
				F	T6	T64	F	T6	T64	F	T6	T64	F	T6	T64
AlSi6Cu4	x	x		90			100			150			170		
AlSi8Cu3	x	x	x	90			100			150			170		
AlSi9Cu3	x	x	x	140 (Druckguss)						240 (Druckguss)					
AlSi7Mg0,3	x	x			190			210	180		230			290	250
AlSi7Mg0,6	x	x			220			240	210		250			320	290
AlSi9Mg	x	x			190			210	180		230			290	250
AlSi10Mg	x	x	x	80	180		90	220	200	150	220		180	260	240
AlSi10 Mg(Cu)	x	x		80	180		90	200		160	220		180	240	
AlSi7MgCu0,5															
AlSi9MgCu0,5															
AlSi9Cu2Mg															
AlSi12CuNiMg	x	x	x					240						280	
AlCu5NiCoSbZr	x			145 (T7)	160 (T5)					180 (T7)	180 (T5)		200		

Legierung	Bruchdehnung A5 [%] min.						Brinellhärte HBS min.						Bigewechselfestigkeit σ_{bW} [MPa]	
	Sandguss			Kokillenguss			Sandguss			Kokillenguss			Sand. (wa)	Kok. (wa)
	F	T6	T64	F	T6	T64	F	T6	T64	F	T6	T64		
AlSi6Cu4	1			1			60			75				
AlSi8Cu3	1			1			60			75			60 - 90	
AlSi9Cu3	<1 (Druckguss)						80 (Druckguss)							
AlSi7Mg0,3		2			4	8		75			90	80	90 - 100	
AlSi7Mg0,6		1			4	6		90			100	90	90 - 100	110 - 115
AlSi9Mg		2			4	6		75			90	80		
AlSi10Mg	2	1		2,5	1	2	50	75		55	90	80	70 - 90	
AlSi10 Mg(Cu)	1	1		1	1		50	75		55	80			
AlSi7MgCu0,5														
AlSi9MgCu0,5													80 - 100	90 - 110
AlSi9Cu2Mg														
AlSi12CuNiMg					<1					100			95 - 105	100 - 110
AlCu5NiCoSbZr	1 (T7)		1 (T5)	8			85 (T7)	80 (T5)					90 - 100	

S - Schwerkraftgießen
 N - Niederdruckgießen
 D - Druckgießen
 F - Gusszustand

T5 - kontrollierte Abkühlung nach dem Guss und
 warmausgelagert oder überaltert
 T6 - Lösungsgeglüht und vollständig warmausgelagert
 T64 - Lösungsgeglüht und nicht vollständig
 warmausgelagert – Überalterung
 T7 - Lösungsgeglüht und überhärtet (warmausgelagert)-
 stabilisierter Zustand

Tabelle 2 Bewertung der Gießverfahren hinsichtlich der wichtigsten Merkmale [92]

Merkmale	Schwerkraftgießen						Niederdruckgießen			Druckgießen
	Kokillengießen				Sandgießen		Kokillen-	Sandgießen		Middle-Pressure
	Kopfguss	Bodenguss	Rotacast	Tridem	Kernpaket	Lost Foam		Cosworth	Grünsand	
Bauteilgeometrie										
- Gestaltungsfreiheit	3	3	3	3	2	1	3	2	1	4
- min. Wanddicke	2	3	3	3	2	2	3	2	2	1
- Maßgenauigkeit	2	2	2	2	2	4	2	2	3	1
Verfahren										
- spez. Invest-Kosten	2	2	3	1	3	1	3	3	2	4
- Werkzeugkosten	3	3	3	3	2	3	3	2	2	2
- Produktivität	3	3	3	1	2	2	5	2	1	3
- Prozesssicherheit	4	3	2	3	3	4	1	2	2	2
- Ausbringung	2	3	2	2	3	2	2	2	2	3
Prozess										
- Erstarrungslenkung	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
- Erstarrungsgeschwindigkeit	2	2	2	2	3	4	2	3	3	1
- turbulenzarme Formfüllung	5	4	2	4	3	5	1	1	1	2
Eigenschaften des G.										
- Gefügestruktur	2	2	2	2	3	4	2	3	3	1
- Dendritenarmabstand an Brennraumseite	2	2	2	2	3	4	2	3	3	2
- Oberflächengüte Brennraum	2	2	2	2	3	4	2	3	4	1
Summe	37	37	34	33	37	43	34	33	32	30
Gesamtwert	2,64	2,64	2,43	2,36	2,64	3,07	2,43	2,36	2,28	2,14

Bewertung: 1= gut bzw. günstig ... 5 = schlecht bzw. ungünstig

Tabelle 3 Bewertung verschiedener Anschnittsysteme

Beschreibung der Variante	Brennraumseite unten; Schlitzanschnitt oben, einseitig	Brennraum unten Anschnitt einseitig unten	Brennraumseite unten, Stufenanschnitt von Stirnseite oder Wasserdeckelseite	Zylinderkopf stehend, vorgesetzter Speiser, Schlitzanschnitt, seitlich
Gleichmäßigkeit der Formfüllung	da einseitiger Anschnitt: nein	von einer Seite her, ruhig von unten nach oben	bei zentralem Anbringen ja, sonst nein	ruhige Formfüllung
Gießtemperatur	durch nahezu Kopfguss relativ gering (700°C-715°C)	hoch	geringer als bei Bodenguss	hoch
Fließwege	kurz	länger durch Anschnittsystem	lang	kurz
Aufwand für Nachbearbeitung	einfaches Trennen Speiser und Lauf,	einfach	ähnlich wie bei Bodenguss	gering, da leichtes Trennen von Anschnittsystem möglich
Aufwand für Kühlung	einfache Kühlung von unten	keine zusätzliche Kühlung	muss zeitversetzt durchgeführt werden, daher aufwendig	hoch durch sequentielle Kühlung
Ausbringen	gutes Verhältnis (ca. 50%)	schlechtes Verhältnis	da kurzes Anschnittsystem und kleine Speiser: gut	nicht so gut, da Speiser groß
Gefügebeeinflussung	sehr gutes Gefüge im Brennraum (DAS \approx 19 μ m), im Speiser wärmere Schmelze	hoher DAS im Brennraum	besser als reiner Bodenguss, schlechter als bei Anschnitt von oben	durch Kühlung guter DAS
Oberflächengüte im Ein- und Auslasskanal-Bereich	abhängig von Kernqualität (Rz \approx 70 μ m)	bei hoher Strömungsgeschwindigkeit von unten her Erosion möglich	wenn Strömungsgeschwindigkeit im unteren Zulauf klein, keine Beeinflussung	keine Beeinflussung durch Anschnittsystem
Einhaltung der Maßgenauigkeit	durch Anschnittsystem nicht beeinflusst,	durch Anschnittsystem nicht beeinflusst	gewährleistet	keine Beeinflussung durch Anschnittsystem
Erstarrung	durch Kühlung und Speiseranordnung gerichtet		gerichtete Erstarrung möglich	gerichtete Erstarrung möglich
Probleme	viele Verwirbelungen, Lufteinschlüsse,	kaltetes Metall im Speiser, Gießzeit und -temperatur	lange Fließwege, Koordination der zeitversetzten Kühlung, Fließwege	Aufwand für Kühlung, viel Kreislaufmaterial,

Tabelle 4 Anforderungen an die Werkzeuge bei unterschiedlichen Gießsystemen [180]

MERKMAL	Bodenguss mit Brennraumseite oben	Kopfguss mit Brennraumseite unten
	Nachteile	Vorteile
Werkzeugaufbau	kompliziert, 2 Läufe nach unten um Stirnzug	einfach, Konstruktion vorhanden
benötigte Kerne	4 Zusatzleisten zum Abdecken Gießlauf und Kontur, mehr als bei Kopfguss	keine Zusatzkerne, alle Konturen im Stahl
Werkzeugbedarf	2 Kernkasten mehr	Zusatzkerne entfallen
Taktzeit (Kerne einlegen)	4 Kerne zusätzlich Taktzeiterhöhung	Zusatzkerne entfallen Taktzeitminimierung
Anschnittmöglichkeiten Bodenplatte, Deckelseite	Ausspülmöglichkeit vorgegossen Wasserraumkern – Füßchen un. Brennräume Ausläufe vorgegeben durch Kontur	optim. Anschnittmögl. Ausläufe variabel
Kernlagerung WRK	auf Zusatzleisten (Kern auf Kern)	auf Stahlgrundplatte
Kernabsaugung nur über Kernmarken	Maßhaltigkeit, Kernbruchrisiko durch Überfahren Seitenteil	
Gießmaschine	aufwendige Sonderkonstruktion, da Kippfähigkeit erforderlich	

Tabelle 5 Bewertungsmatrix Kopf- und Bodenguss [180]

	<u>Kopfguss</u>	<u>Bodenguss</u>
	<i>Bewertung:</i>	<i>Bewertung:</i>
Mechanische Kennwerte	1	4
Kondensatbildung	4	2
Verwirbelungsverhalten bei der Formfüllung	5	2
Nachspeisungsverhalten	3	4
Erforderliche Gießtemperatur	2	4
Kerngasbildung durch Gießtemperatur	3	4
Summe:	18	20
Gesamtbewertung:	3,00	3,33

(1 = sehr gut / 2 = gut / 3 = befriedigend / 4 = genügend / 5 = ungenügend)

Tabelle 6 Übersicht von gießereitechnischen Simulationsprogrammen [181]

Bezeichnung	Herkunftsland	Methode	Simulation beinhaltet			
			Formfüllung	Erstarrung und Abkühlung	Spannungen	Struktur
PROCAST	U.S.A	FEM	X	X	X	X
SIMTEC	Deutschland	FEM	X	X	X	X
MAGMA SOFT	Deutschland	FDM	X	X	X	X
NOVA FLOW NOVA SOLID	Schweden	FDM	X	X	-	X
SIMULOR	Frankreich	FDM	X	X	-	-
SOLSTAR	Großbritannien	MM	-	X	-	-
THEL	Deutschland	FDM	-	X	X	-
PAM-CAST	Frankreich	FDM	X	X	-	X
AFS SOLIDI- FICATION SYSTEM 3D	U.S.A	FDM	X	X	-	-
CAP	U.S.A	FDM	X	X	X	X
CAST CAE	Frankreich	FDM	X	X	-	X
CAST VIEW	Kanada	FDM	X	X	-	X
FLOW 3D	U.S.A	FDM	X	X	-	X
MAVIS DIANA	Großbritannien	FDM	X	X	-	-
PASSAGE/ POWERCASE	U.S.A	FEM	X	X	X	X
CALCO SOFT	Schweiz	FEM	X	X	-	X
METAL Core /FORECAST	Kanada	FEM	X	X	X	X

FEM (Finite Elements Method)
FDM (Finite Differences Method)
MM (Module Method)

LEBENS LAUFZur Person

Name: Dr.-Ing. Marko GRZINCIC
 geboren am: 24. 7. 1971
 in: Liberec
 Staatsangehörigkeit: tschechisch
 Familienstand: ledig
 Eltern: Jan Grzincic, Dipl.-Ing. , geb. 29. 3. 1945
 Jaroslava Špetlová Grzincicová, geb. 13. 11. 1947

Ausbildung

09/77 – 08/85 13. Hauptschule in Liberec XV - Starý Harcov
 09/85 – 08/89 Erweiterte Oberschule für Maschinenbau und Elektrotechnik Liberec,
 Schwerpunkt: Maschinenbaukonstruktion
 Abschluss – Abitur mit Gesamtnote „sehr gut“
 09/89 – 06/95 Technische Universität in Liberec
 Studiengang: Maschinenbautechnologie
 24. 6. 1995 Staatsexamen im Fach Wärmebehandlung und Materialprüfung,
 Abschluss: Diplom-Ingenieur für Werkstofftechnik

Beruflicher Werdegang

2.10.95 - 30.9.98 Technische Universität in Liberec
 Postgradualstudium (Doktorand) im Fach Maschinenbautechnologie,
 Thema: Computersimulation von Gießprozessen
 08/97 Sprachsommerkurs an der Technischen Universität Dresden
 (4 Wochen)
 28. 2. 1998 Rigorosum (staatliche Prüfung) im Fach Gießereiwesen
 2.3. - 23.6. 1998 Studienaufenthalt an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
 (Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung) im Rahmen des
 Tempus-Projektes

- 1.10.'98 – 20.8.'00 Doktorand an dem Lehrstuhl für Urformtechnik des Institutes für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- 21.8.'00 – 30.8.'02 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, dem Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung
3. 2. 2003 Promotionskolloquium – Verteidigung der Dissertation „Gießvorgänge beim Kokillenguss von Al-Legierungen“
- 3.9.'02 – 28.2.'03 Projektleiter in der Grauguss-Gießerei Škoda Auto AG in Mladá Boleslav (CZ)
- ab 1.3.'03 Gießereileiter bei Škoda Auto AG in Mladá Boleslav (CZ)

Sonstiges: Mitglied der Tschechischen Gießereigesellschaft

Mitgliedschaft im Tschechischen Jagdverein und im Tschechischen Bergsteigerverein

1997 – Stellvertreter des Vorsitzenden des akademischen Senats der Technischen Universität in Liberec

Magdeburg, den 7. März 2003

Dr.-Ing. Marko Grzincic