

Gußstücke aus neuen Werkstoffen für moderne thermische Kraftwerke

R..Hanus, A. Buberl; Voest-Alpine Gießerei Linz GmbH, Linz, Österreich

Kurzfassung

Gußstücke aus kriechbeständigen Stählen spielen eine Schlüsselrolle in fossil befeuerten Kraftwerken, für hochbeanspruchte Komponenten im Hoch- und Mitteldruck-Teil der Turbinen. Innen-, Außen- und Ventilgehäuse, Einlaßstutzen und Krümmer sind Beispiele für diese kritischen Komponenten. Im Zuge der Entwicklung immer höherer Wirkungsgrade der Kraftwerke und der permanenten Verbesserung der Kriechbeständigkeit der verwendeten Werkstoffe müssen auch die Stahlguß-Werkstoffe an die steigenden Anforderungen angepaßt werden. Der gegenständliche Artikel zeigt den Beitrag einer Stahlgießerei im europäischen COST-Programm zur Entwicklung eines neuen 10%Cr-Stahls. Weiters soll dargestellt werden, wie die neuen 9-10%Cr Stahlgußstypen G-X 12 CrMoWVNbN 10 1 1 und G-X 12 CrMoVNbN 9 1 von der Entwicklung in die kommerzielle Produktion schwerer Gußstücke übergeleitet werden.

1 Einleitung

Parallel zu den laufenden F&E Aktivitäten im Rahmen des EU-Projekts COST 501, wurde in der Gießerei der Voest Alpine Stahl Linz bereits 1992 die kommerzielle Produktion von Gußstücken aus den neuen 9-10% Cr-Stählen, mit und ohne Wolfram-Zusatz begonnen. In den folgenden Ausführungen soll von den vielfältigen Aspekten der Herstellung großer Gußstücke für den Dampfturbinenbau im Gewichtsbereich von 1 bis 60 Tonnen berichtet werden. Der Bericht basiert auf den Erfahrungen der Produktion der letzten 6 Jahre, während dieser Zeit wurden die Ergebnisse der europäischen Forschungsarbeiten im Rahmen von COST 501 in die Gießereipraxis übergeleitet. Einige Details wurden bereits in [2] berichtet.

Die ersten Schweißversuche waren fehlerfrei und zeigten die gute Schweißbarkeit der neuen 9-10% Cr Stähle, unter der Voraussetzung daß die entsprechenden Schweißparameter eingehalten wurden, was bei schweren Gußstücken höchste Ansprüche an die Qualifikation des Schweißbetriebes stellt. Ergebnisse aus Analysen der für Stahlguß typischen Fehlererscheinungen erforderten eine aufwendige Anpassung der Gieß- und Speisertechnik entsprechend dem Erstarrungsverhalten der neuen 9-10% Cr Stähle. Dies führte zu einer Reduktion von Fehlern durch unzureichende Speisung (Schrumpfungen) bei den folgenden Gußstücken. Durch die Erfahrungen, welche im Zuge von umfangreichen zerstörungsfreien Prüfungen gemacht wurden, konnte die Prüfbarkeit erwiesen werden. Die Produktion von nahezu 100 Gußstücken aus den neuen 9-10% Cr Stählen im Gewichtsbereich von 1 bis 60 Tonnen zeigt, daß die Erfüllung der hohen Qualitätsanforderungen an kritische Dampfturbinenkomponenten für die neuen 9-10% Cr Stähle mit gleichem Maß erreicht werden kann, wie für die bisher eingesetzten 1% Cr Stähle.

2 COST 501 Programm

2.1 Rolle einer Stahlgießerei im europäischen Großprojekt

2.2 Stahlguß Programm

Aus Laborschmelzen wurde die vielversprechendste Legierung ausgewählt und daraus gegossene Platten hergestellt. Diese Platten wurden mit artgleichem Schweißzusatzwerkstoff geschweißt, um im Rahmen einer Schweißverfahrensprüfung die mechanischen Eigenschaften, die Mikrostruktur und die Zeitstandeigenschaften zu untersuchen [1].

Auf Basis dieser Voruntersuchungen zur Festlegung der chemischen Analyse und Wärmebehandlung wurde ein Pilot-Ventilgehäuse abgegossen, um die Gießbarkeit von Kraftwerks-Komponenten, sowie zerstörungsfreie Prüfbarkeit und Schweißbarkeit zu verifizieren.

Details dieser Programme aus COST 501, Runde II und III Programme wurden in [2] berichtet.

2.3 Schweiß Programm

Da das Schweißen einen wesentlichen Fertigungsschritt bei der Herstellung von Stahlgußteilen darstellt war das Arbeitsprogramm Schweißen innerhalb COST 501 und die Entwicklung von Schweißzusatzwerkstoffen ein wichtiger Faktor für die Gießerei. Die Untersuchungen und Ergebnisse der Arbeitsgruppe Schweißen aus COST 501 Runde II wurden in [3] und [4] berichtet.

3 Herstellungsprozeß von schweren Stahlgußteilen

Abbildung 1 zeigt die wesentlichen Schritte im Fertigungsprozess von schweren Stahlgußstücken für den Kraftwerksbau.

Nach der Erstellung der Gußtechnik, dem Bau des Holzmodells und dem Einformen beginnt die Existenz des Gußstückes mit dem Schmelz- und Gießprozeß.

Da Gußteile in derartigen Dimensionen (bis 100 Tonnen) keine Fehler haben dürfen, die zu Ausschuß führen könnten, werden Gieß- und Erstarrungsprozeß während der Design-Phase am Computer simuliert, um kritische Zonen für Schrumpfungen zu erkennen und diese von vornherein zu verhindern (siehe Abbildung 2:).

Nach der Erstarrungszeit (2 bis 6 Wochen, je nach Wandstärke, Komplexität und Werkstoff) wird das Gußstück ausgeschlagen. Das Handling des Gußstücks in diesem Zustand ist äußerst kritisch, da das Gefüge im Gußzustand sehr spröde ist. Deshalb sind spezielle Wärmebehandlungen notwendig, um den hohen thermischen Spannungen beim thermischen Abtrennen der Steiger standzuhalten. Der Temperaturbereich in dem das Steigertrennen durchgeführt wird ist ebenso kritisch, da die Spannungen, welche durch verschiedene Temperaturgradienten und Wanddicken bedingt sind, nicht durch Spannungen aus Umwandlungsvorgängen im Mikrogefüge überlagert werden sollen.

Die Qualitätswärmebehandlung ist neben der chemischen Zusammensetzung der wichtigste Schritt zur Einstellung des erwünschten Mikrogefüges und der geforderten mechanischen Eigenschaften, als Basis für die Kriechbeständigkeit bei hohen Temperaturen.

Nach dem Vorschruppen wird das Gußstück zerstörungsfrei geprüft (mit magnetischer Streuflußprüfung, Ultraschall- und Röntgenprüfung). Alle Anzeigen, die nicht dem anzuwendenden Annahmestandard entsprechen sind auszumulden. Nach magnetischer Streuflußprüfung der Schleifmulden werden diese verschweißt, gefolgt von einer Spannungsarmglühung.

Zwischen den einzelnen Produktionszyklen werden immer wieder Maßkontroll-Schritte durchgeführt, um festzustellen, ob bestimmte geforderte Übermaße für die Fertigbearbeitung oder für den Einsatz kritisch werden könnten.

Eine abschließende zerstörungsfreie Prüfung ist der letzte Fertigungsschritt in der Gießerei, bevor das Gußstück zur Fertigbearbeitung gesandt wird.

4 Einführung von 9-10%Cr Stählen in die kommerzielle Produktion schwerer Stahlgußteile

4.1 Überlegungen zu den Produktionsprozessen

Folgende Hauptgesichtspunkte sind für die kommerzielle Produktion von neuen, in F&E-Programmen entwickelten, Stahlguß-Werkstoffen zu berücksichtigen:

- *Gießtechnik und Erstarrungssimulation*

Die optimale Gestaltung der Gieß- und Speisertechnik ist eine der Hauptbedingungen für die Herstellung eines „dichten“ Gußstücks. Die Erstarrungsparameter der 9-10%Cr Gußstähle sind anders als jene der niedriglegierten 1CrMo(V) Stähle, deshalb ist das Schrumpfungsverhalten der hochlegierten 9-10%Cr Gußstähle komplexer, besonders in dicken Querschnitten und Massenanhäufungen.

- *Schmelzen und Gießen*

Rohmaterialien von hoher Qualität, gründliche Stahlerzeugung und Gießpraxis sind erforderlich um die chemische Zusammensetzung genau zu erreichen („Punktanalysen“) und Einschlüsse zu minimieren. Sekundärmetallurgie im Pfannenofen-Prozeß ist dafür eine wichtige Voraussetzung.

Abbildung 3: zeigt den Erschmelzungs-Prozeß, der in der Gießerei der VOEST ALPINE STAHL angewandt wird.

Die wichtigsten Kriterien, die beim Schmelzen und Gießen der neuen 9-10%Cr Stahlgußsorten zu beachten sind, werden in [2] beschrieben.

- *Mikrostruktur*

Wichtige Überlegungen zur Mikrostruktur der neuen 9-10%Cr Stähle, besonders in dicken Querschnitten von schweren Gußstücken, betreffen Seigerungen von C und Delta Ferrit, sowie die notwendige Einstellung der chemischen Analyse, diese sind in [2] beschrieben.

- *Wärmebehandlung und Mechanische Eigenschaften*

Abbildung 4: zeigt wesentliche Schritte im Fertigungsprozeß in Form eines Zeit/Temperatur Ablauf-Diagramms, beginnend von der Abkühlung in der Form bis zur abschließenden Spannungsarmglühung.

Aufgrund der für Turbinengehäuse typischen Wanddickenunterschiede ist die Temperaturverteilung in den verschiedenen Querschnittsbereichen für die Temperaturbereiche der Martensitumwandlung besonders kritisch. Deshalb muß die Logistik des Handlings der Teile auf die Gegebenheiten des Gefüges in diesen kritischen Zuständen abgestimmt werden.

Gußstücke in solchen Dimensionen für große Turbinengehäuse benötigen mehrere und längere Wärmebehandlungszyklen. Die großen Wandstärken erfordern lange Haltezeiten, und bei großen und kritischen Schweißungen sind Zwischenglühbehandlungen notwendig, um die Schweißspannungen zu begrenzen.

Der Einfluß mehrerer Spannungsarmglühungen mit langen Haltezeiten wurde untersucht. Gegossene Platten mit 100 mm Wandstärke wurden einer Anzahl von Glühbehandlungen ausgesetzt. Abbildung 5: zeigt die angewendeten

Wärmebehandlungen und Haltezeiten für gegossene Platten aus 9-10%Cr Stahlguß mit und ohne Wolfram-Zusatz (COST- und P91-Variante). Die Ergebnisse aus den Zugversuchen zeigen, daß durch mehrere Anlaßglühungen mit langen Haltezeiten Zugfestigkeit und Dehngrenze stark sinken. Diese Tatsache muß in den Mindestanforderungen der Spezifikationen für schwere Stahlgußstücke berücksichtigt werden.

Basierend auf diesen Ergebnissen wird als Mindestwert für die Normierung der 0,2-Dehngrenze 520 MPa für den W-legierten Gußstahl G-X 12 CrMoWVNbN 10 1 1 vorgeschlagen. Mit den beschriebenen Untersuchungen konnte gezeigt werden, daß die Festigkeit des W-legierten Stahles höher liegt als jene des W-freien 9% Cr Stahles, unter Anwendung derselben Anlaßtemperatur von 730°C. Daher wird für die Normierung der 0,2-Dehngrenze des W-freien Gußstahls G-X 12 CrMoVNbN 91 ein Mindestwert von 480-500 MPa vorgeschlagen.

- *Zerstörungsfreie Prüfung und Gußfehler*

Einer der vielen Vorteile von Stahlguß als Konstruktionswerkstoff für komplexe Teile wie Turbinenkomponenten ist die Tatsache, daß Ungängen durch Schweißen beseitigt werden können. Das Fertigungsschweißen ist ein wesentlicher Schritt im Fertigungsablauf von Stahlgußstücken (siehe Abbildung 1). Das Schweißvolumen bezogen auf das Gußstückgewicht ist ein Kostenfaktor, es ist abhängig vom Typ und der Komplexität von Konstruktion und Werkstoff.

Eine genaue Beschreibung der Hauptfehlertypen und eine Gegenüberstellung des Schweißvolumens der neuen 9-12% Cr Stähle und der vielfach eingesetzten 1% CrMo(V)-Stähle ist in [2] dargestellt.

- *Schweißen*

Aufgrund der hohen Eigenspannungen der 9-10% Cr Stähle, bedingt durch das martensitische Gefüge, werden größere Fertigungs- und Konstruktions-schweißungen in Teilschritten mit Zwischen-Spannungsarmglühungen durchgeführt. Grundsätzlich kann bestätigt werden, daß die Schweißbarkeit der neuen Stähle zufriedenstellend ist. Voraussetzungen sind: die Einhaltung der spezifischen Bedingungen von martensitischen hoch Cr-legierten Stähle und strikte Qualitätskontrolle der Schweißprozesse.

- *Fertigungsdauer und -kosten*

Gegenüber den oft verwendeten 1% CrMo(V) Stahlgußtypen ist die Durchlaufzeit für die neuen 9-10% Cr Stähle um 2-4 Wochen länger, je nach Größe und Komplexität der Gußstücke.

Folgende Aspekte bewirken die höheren Kosten und längeren Durchlaufzeiten für 9-10% Cr-Stähle:

- Materialkosten
- Komplexe Gießtechnik bewirkt geringeres Ausbringen (=Verhältnis von eingesetztem Flüssigstahl zu Rohgußgewicht), besonders für schwere und aus gießtechnischer Sicht komplizierte Konstruktionen. Das linke Diagramm aus Abbildung 6: zeigt den Unterschied im Ausbringen von 1%CrMo(V) Stahl, 9-10%Cr Stahl und dem Gesamt-Durchschnittswert aller Werkstofftypen. Das rechte Diagramm aus Abbildung 6: zeigt die mit steigendem Rohgußgewicht verbundene Zunahme des Flüssigstahleinsatzes, der notwendig ist um den erhöhten Speisungsbedarf zu decken. Entsprechend sinkt natürlich das Ausbringen.
- Aufwendiges Handling der Gußstücke beim Ausschlagen, Putzen und Steigertrennen. Das bedeutet zusätzliche Wärmebehandlungszyklen und Zwischenerwärmungsphasen.

- Komplexe und längere Wärmebehandlungszyklen im gesamten Produktionsprozeß (siehe Abbildung 4:)
- Zwischenspannungsarmglühungen für Fertigungs- und Konstruktions-schweißungen mit großem Schweißvolumen.
- Neue Ausprägung bekannter Fehlertypen bewirken größere Schleifmulden und dadurch höheres Schweißvolumen.
- Der hoch-Cr-hältige Schrottanteil, legiert mit W, Nb, N ist schwierig zu verkaufen, sogar für Preise die niedriger sind als jene von un- und niedriglegiertem Schrott. Dadurch steigen die Gießerei internen Kosten für Kreislaufmaterial.

Die Darstellung der höheren Kosten wurde auf Basis der Erfahrung der bisherigen Produktion gemacht. Einerseits profitieren wir alle von den großen Bemühungen in die Erhöhung der Wirkungsgrade von Kraftwerken und der Reduktion der CO₂-Emissionen, andererseits müssen wir akzeptieren, daß die Herstellung der Werkstoffe, welche den erhöhten Temperaturen und Dampfzuständen fortschrittlicher Kraftwerke standhalten, höhere Kosten verursachen. Genaue Analysen haben ergeben, daß der Unterschied in den Herstellungskosten der Gußstücke aus den herkömmlichen 1%CrMo(V)- und den neuen 9-10%CrMo(W)VNbN- Werkstoffen 20 - 40 % ausmachen, abhängig von Größe und Schwierigkeitsgrad der Teile. Aufgrund der besonderen Werkstoffcharakteristik der modifizierten 9-10%Cr-Stähle sind die Aufwendungen für sehr große und dickwandige Gußteile am höchsten.

Die Erfahrung der letzten fünf Jahre in der Produktion von Gußteilen aus modifizierten 9-10%Cr-Stählen für fortschrittliche Kraftwerke in Europa und Übersee haben gezeigt, daß die Qualität der Gußteile aus den neuen Werkstoffen in der gleichen Weise gesichert ist, wie bei den herkömmlichen, niedriglegierten Werkstoffen.

4.2 Realisierte Projekte und Beispiele von produzierten Stahlgußteilen aus 9-10%Cr Stählen

Die Überleitung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in die betriebliche Praxis wurde stufenweise vollzogen, wobei die Steigerung der Gewichte von 3.5 t (Pilot-Ventilgehäuse) auf 14 t (erstes Innengehäuse für das Kraftwerk Schkopau) mit enormen Risiken für Hersteller und Turbinenbauer verbunden war. Trotzdem wurden inzwischen perfekte Gußteile mit Gewichten bis zu 60 Tonnen aus G-X 12 CrMoWVNbN 10 1 1 erfolgreich hergestellt.

Ein vollständiger Überblick über jene Kraftwerke, in denen der neue W-legierte und W-freie 9-10%Cr-Stahlguß bisher eingesetzt wurde, ist in [2] gegeben.

Einige Beispiele sollen einen Eindruck solcher Gußteile vermitteln.

Abbildung 7: zeigt die ersten realisierten Projekte, nämlich Mitteldruck-Innengehäuse für die Kraftwerke SCHKOPAU (14 Tonnen) und MERI PORI (19 Tonnen). Der erste große Sprung in Gewicht und Schwierigkeitsgrad war das Mitteldruck-Innengehäuse für SCHWARZE PUMPE (40 Tonnen), mit angeschweißten gegossenen Krümmern (siehe Abbildung 8:). Die Hoch/Mitteldruck-Innengehäuse für die dänischen Kraftwerke SKÆRBÆK und NORJYLLAND waren eine weitere Herausforderung, besonders für Gießtechnik und Schmelz- und Legierungspraxis (siehe Abbildung 9:). Das größte bisher hergestellte Ventilgehäuse aus den neuen Stählen war für das Kraftwerk LIPPENDORF (siehe Abbildung 10:).

Eine absolute Meisterleistung in allen Belangen der Gießerei-Technologie waren die Gehäuse für das Projekt BOXBERG: ein 60 Tonnen schweres Mitteldruck-Innengehäuse mit einem notwendigen Einsatz von 113 Tonnen flüssigem Stahl ist das größte Gußstück, das bisher aus 10%CrMoWVNbN-Stahl hergestellt wurde (siehe Abbildung 11:).

Besonders schwierig war ein Hochdruck-Einströmgehäuse (31 Tonnen) mit 2 angeschweißten Ventilgehäusen (je 18 Tonnen) und einer Schweißnahtdicke von 185 mm (siehe Abbildung 12:).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Abbildung 13: zeigt die Entwicklung in der Produktion von Rohgewicht und Flüssigstahl seit der Einführung der neuen 9-10%Cr-Stähle in der VOEST-ALPINE GIESSEREI LINZ im Jahr 1992. Der Anteil des gesamten Produktionsvolumens erreichte 1997 15%. Diese Tatsache und die erwähnten Beispiele zeigen, daß die technische Einführung von Werkstoffen aus F&E-Projekten in die kommerzielle Produktion höchst erfolgreich und schnellstmöglich durchgeführt werden konnte.

Die neuen, noch höheren Ziele mit noch komplexeren Werkstoffen, innerhalb des europäischen Projekts COT 522 werden auch für die Gießerei Industrie wiederum eine Herausforderung darstellen.

6 Danksagung

Die schwierige, aber erfolgreiche Überleitung von F&E Arbeiten in die betriebliche Praxis wurde durch eine exzellente Kooperation mit unseren Kunden und die gute Unterstützung der COST 501 - Arbeitsgruppe erreicht. Dafür möchten wir unseren Dank ausdrücken. Besonderer Dank gebührt den Mitgliedern der österreichischen Teilnehmer am Projekt COST 501, unter der technischen Leitung der Technischen Universität Graz, Institut für Werkstoffkunde, Schweißtechnik und spanlose Formgebungsverfahren und der finanziellen Unterstützung des österreichischen Forschungs-Förderungs-Fonds.

7 Literatur

- [1] Gysel W., Trautwein A., Mayer K.H., "10 % CrMoWVNbN Cast Steel for casings for advanced Steam Cycles - A Collaborate European Effort in COST 501/II", Third International Conference on Improved Coal Fired Power Plants, 1991 held in San Francisco.
- [2] Mayer K.H., Hanus R., Kern T., Staubli M., Thornton D.V., " High temperature cast components for advance steam power plant", 6th Liege Conference „Materials for Advanced Power Engineering“, 5-7 October 1998, Liege, Belgium
- [3] Cerjak H., Schuster F.A., „Weldability and behaviour of weldings in newly developed creep-resistant 9-10% Cr steels“, Second European Conference on Joining Technology - Eurojoin 2, Florence, Revista Italiana della Saldatura 4/94, pp.467 - 473.
- [4] Cerjak H., Letofsky E., Staubli M., „The role of welding for components made from advanced 9-12% Cr steels“, 6th Liege Conference „Materials for advanced Power Engineering“, 5-7 October 1998, Liege, Belgium

8 Bilder

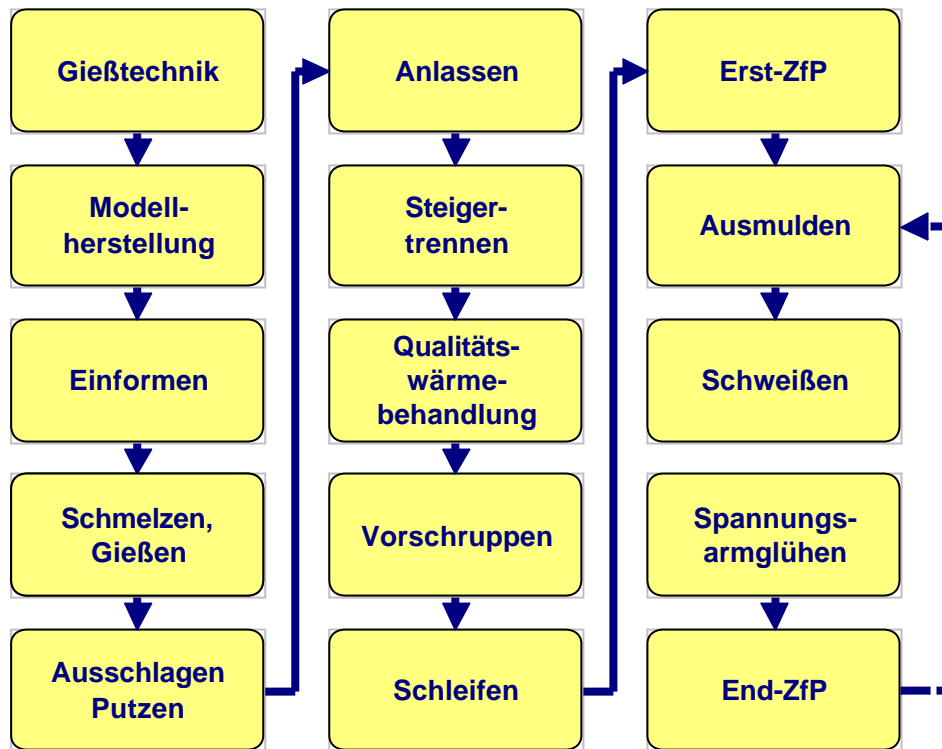


Abbildung 1: Typischer Fertigungsplan für schwere Stahlgußstücke

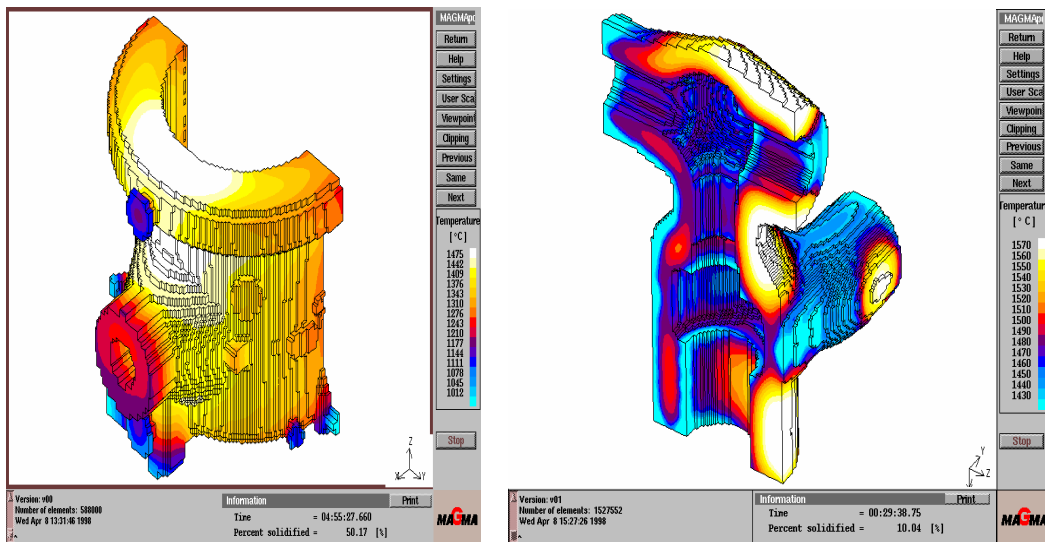


Abbildung 2: Erstarrungssimulation eines Einström- und Ventilgehäuses welche später zusammenschweißt werden (G-X 12 CrMoWVNbN 10 1 1)

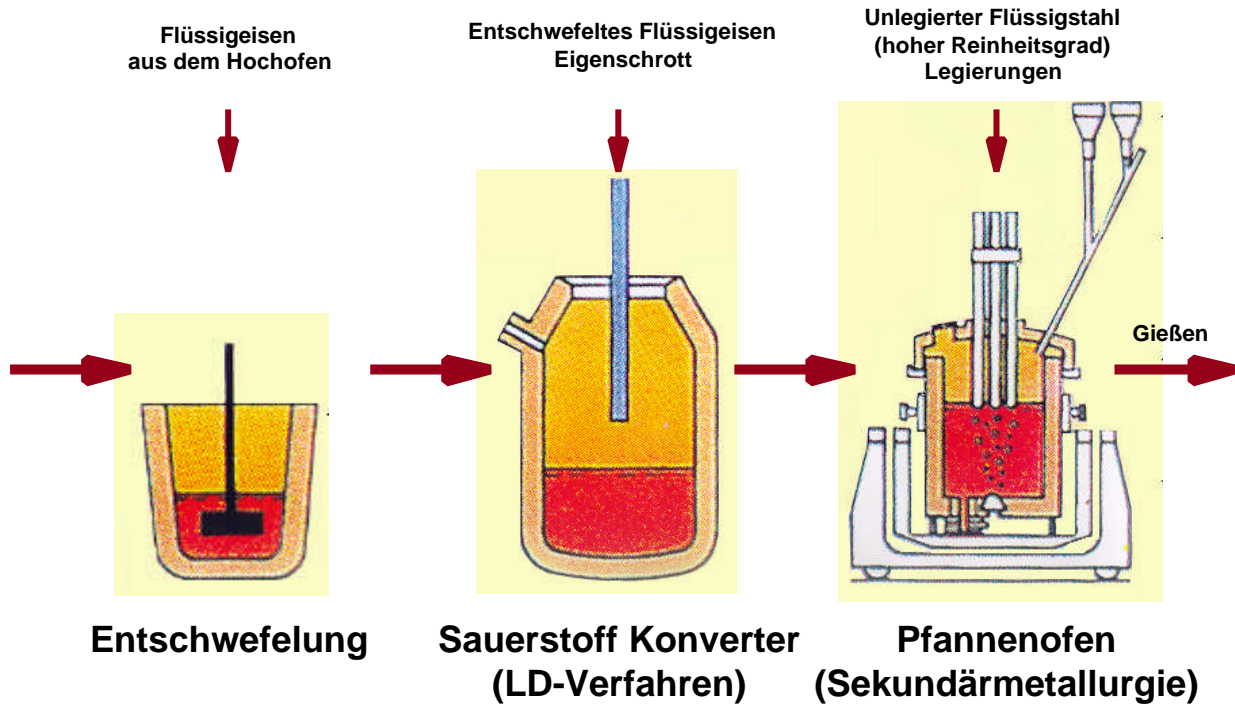


Abbildung 3: Stahl-Herstellungsprozeß bei Voest-Alpine Gießerei Linz

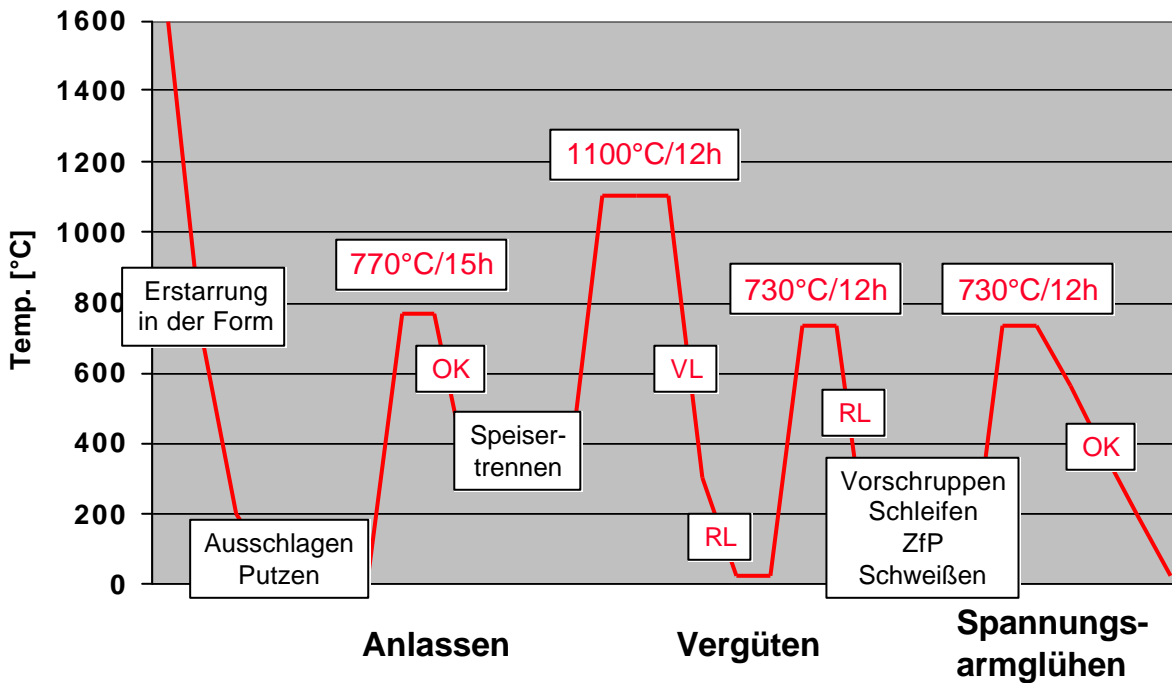


Abbildung 4: 9-10%Cr Stahlgußteile – Zeit/Temperatur Geschichte:
 minimal notwendige Wärmebehandlungs-Zyklen
 während der Fertigung in der Gießerei

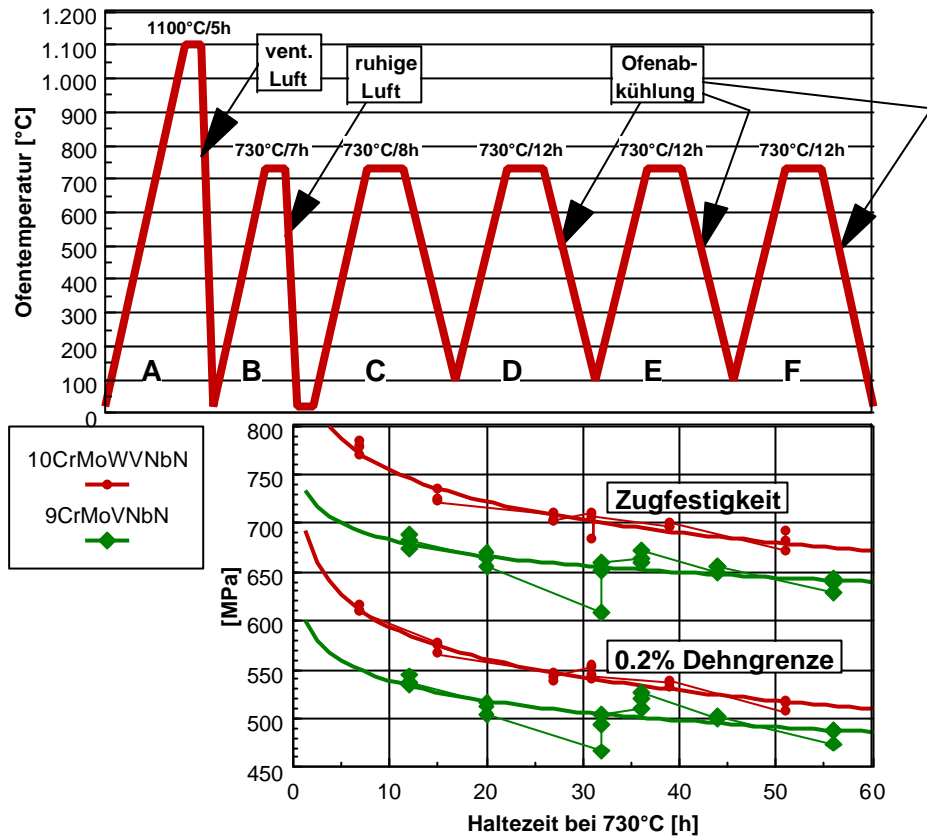


Abbildung 5: Untersuchungsprogramm: Einfluß langer Glühzeiten auf die mechanischen Eigenschaften der neuen 9-10%Cr Gußstähle

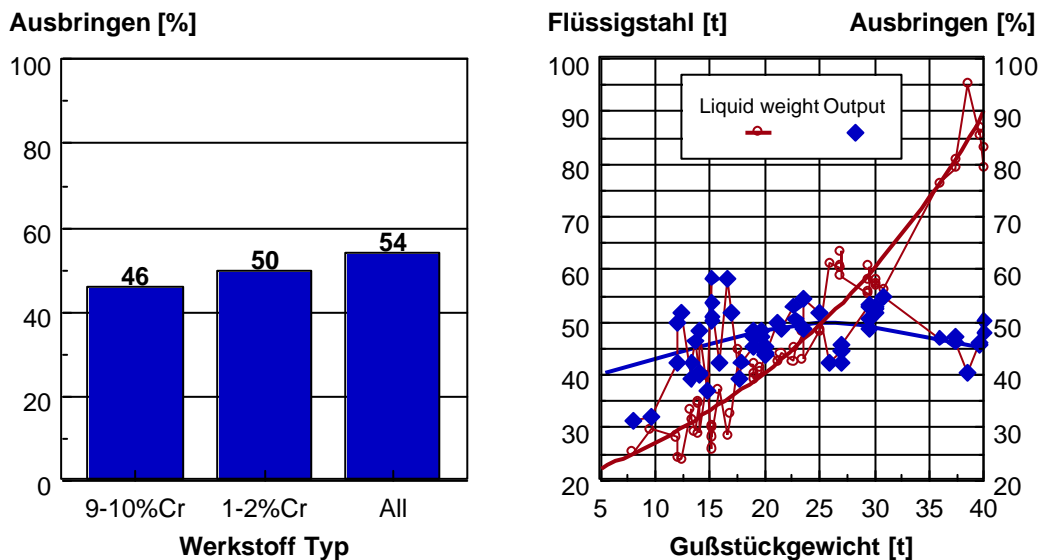


Abbildung 6: Ausbringen-Vergleich: 9-10%Cr-Stahl, 1-2%Cr-Stahl, Gesamtdurchschnitt aller Werkstoffe in der Produktion; Flüssigstahleinsatz und Ausbringen zum Rohgewicht für 9-10%Cr Stahlgußstücke

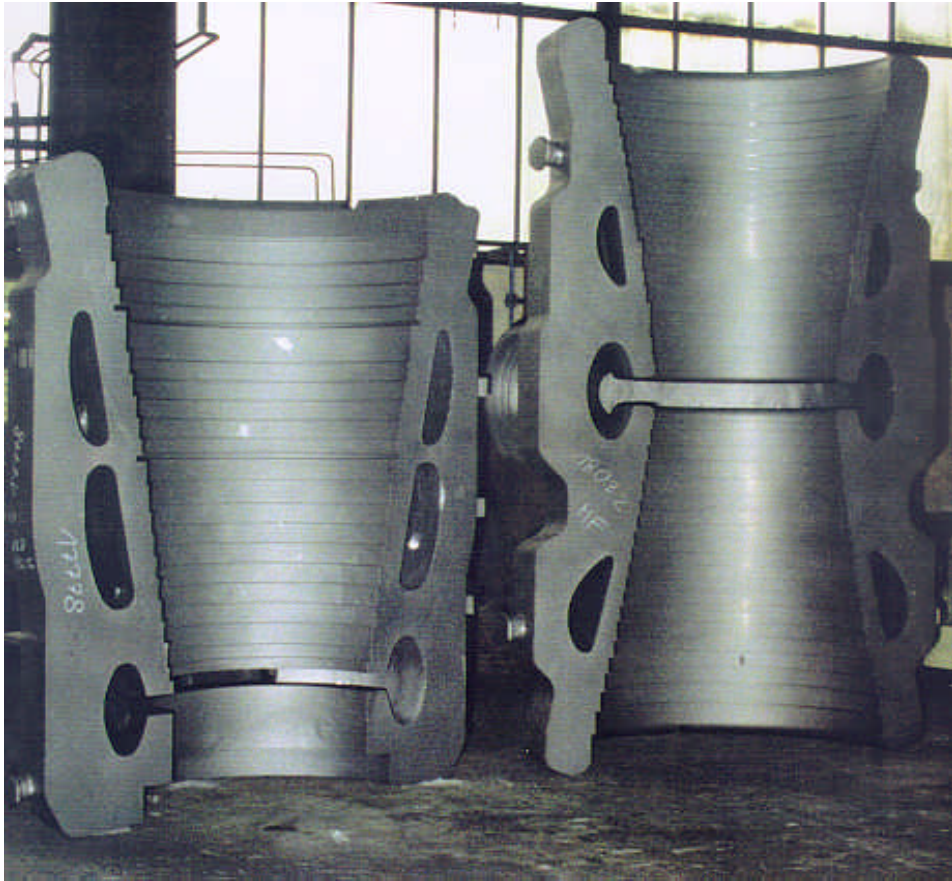


Abbildung 7: Projekte Schkopau und Meri Pori MD Innengehäuse, 14 t und 19 t (G-X 12 CrMoWVNbN 10 1 1)



Abbildung 8: Projekt Schwarze Pumpe, MD Innengehäuse, 40 t mit angeschweißten, gegossenen Krümmern (G-X 12 CrMoWVNbN 10 1 1)

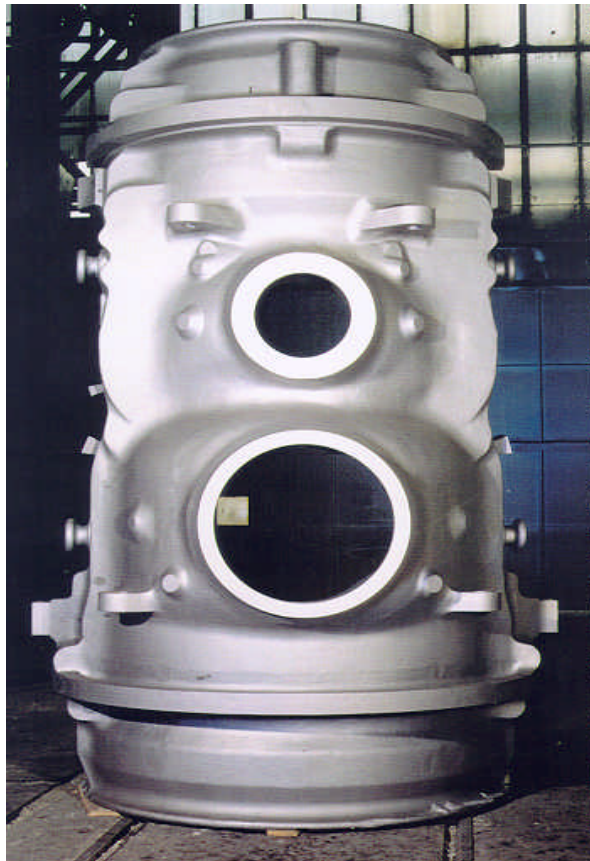


Abbildung 9: Projekte Skærbæk und Nordjylland, HD/MD-Innengehäuse
20 t, (G-X 12 CrMoVNbN 9 1)

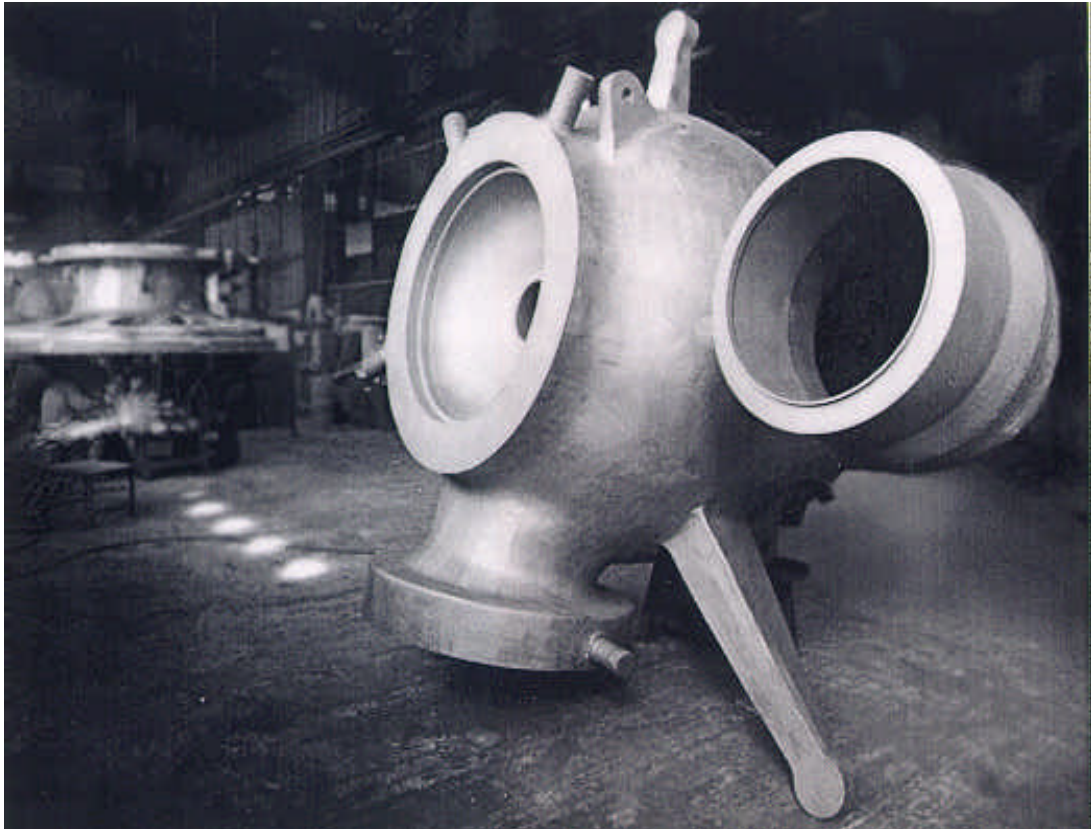


Abbildung 10: Projekt Lippendorf, Ventilgehäuse
27 t (G-X 12 CrMoWVNbN 10 1 1)



Abbildung 11: Projekt Boxberg, MD Innengehäuse
60 t (G-X 12 CrMoWVNbN 10 1 1)

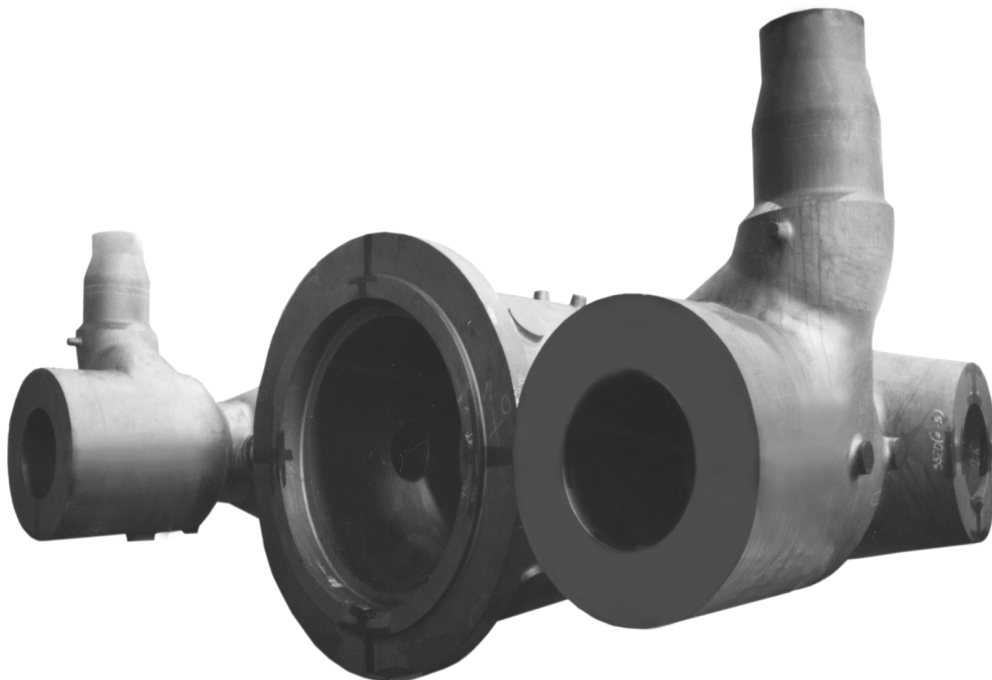


Abbildung 12: Projekt Boxberg, Einströmgehäuse, 31 t und 2 Ventilgehäuse, 2x18 t
zusammengeschweißt (G-X 12 CrMoWVNbN 10 1 1)

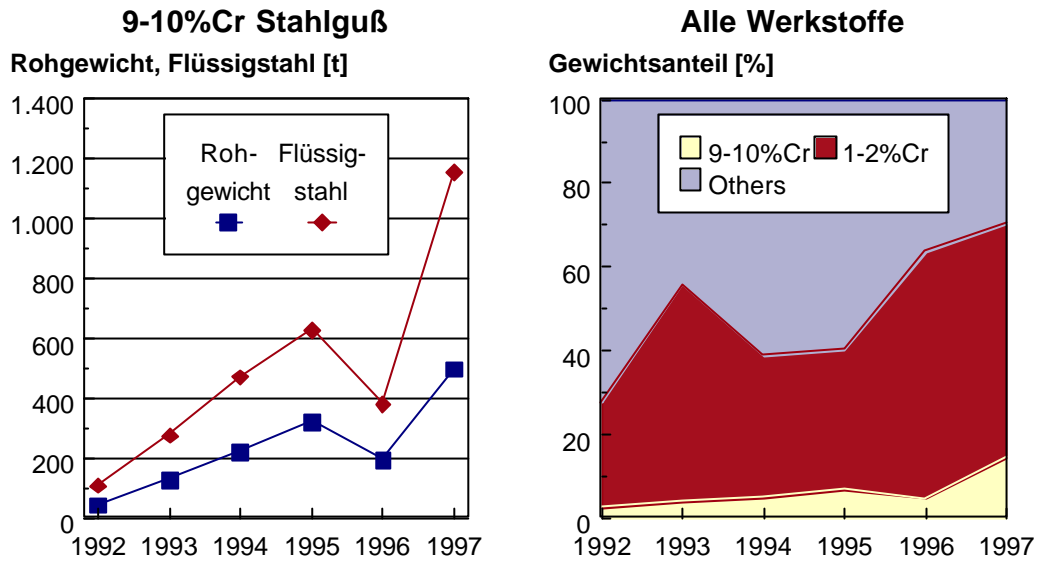


Abbildung 13: 9-10%Cr-Stahlguß – Entwicklung von Rohgußproduktion und Flüssigeinsatz;
- Entwicklung des Produktionsanteils