

# Messung und Simulation von Eigenspannungen in Gusseisen

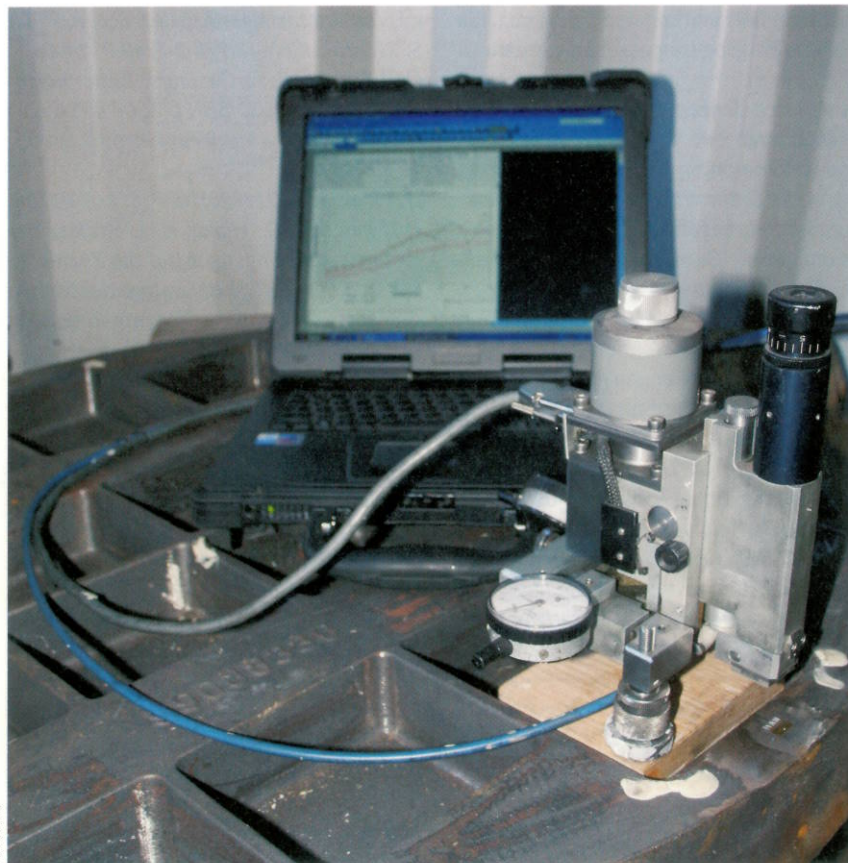


FOTO: IFG

Mit einer Bohrturbine (rechts) wird die Eigenspannung nach dem sogenannten Bohrlochverfahren bei einer Gussspalette gemessen.

VON ULRICH QUACK, WOLFRAM STETS  
UND GOTTHARD WOLF, DÜSSELDORF

Die Anforderungen an gegossene Bauteile aus Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) und Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL) werden hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften (Betriebsfestigkeit) und Maßhaltigkeit (Verzug) immer höher. Gleichzeitig führt im Zusammenhang mit Leichtbaustrategien die Ausnutzung aller Vorteile des Fertigungsverfahrens Gießen durch den Konstrukteur dazu, dass die Geometrien von Gussteilen immer komplexer werden. Dadurch kommt es zur Zunahme von Wanddickenunterschieden, zur Verwendung von mehr und komplexeren Kernen sowie zur Darstellung von Außenkonturen durch Kernformstoffe.

Eine Folge dieser Tendenzen in der Gussteilkonstruktion ist die Zunahme von gieß-

bzw. abkühlungsbedingten Eigenspannungen in den betreffenden Bauteilen. Diese Zunahme des Eigenspannungsniveaus kann aufgrund der erwähnten steigenden Anforderungen aber immer weniger toleriert werden.

Neben diesen letztendlich auch konstruktiv bedingten Eigenspannungen bestimmen jedoch auch die Fertigungsbedingungen in der Gießerei das Eigenspannungsniveau von Gussteilen. Die Einflüsse bestimmter Fertigungsbedingungen auf die Entstehung von Eigenspannungen sind jedoch systematisch kaum untersucht bzw. nur qualitativ bekannt.

Eine weitere Unsicherheit hinsichtlich des Eigenspannungsniveaus in Gussteilen aus GJL ist eine vermeintliche Spannungsrelaxation bei Raumtemperatur. Bisher vorliegende qualitative Erkenntnisse und Erfahrungswerte lassen sich aufgrund

fehlender quantitativer Zusammenhänge praktisch nicht anwenden.

Die Beurteilung von Eigenspannungen in Gussteilen setzt eine hinreichend genaue Bestimmung dieser mechanischen Spannungen voraus. Das kann zum einen mit verschiedenen Messverfahren und zum anderen mit Hilfe der rechnerischen Simulation erfolgen. Sowohl die Ergebnisse der Messverfahren als auch die Simulationen verfügen jedoch gerade bei Gusseisenwerkstoffen über eine noch unbefriedigende Genauigkeit.

## Entstehung und Beeinflussung von Gusseigenspannungen

Eine wesentliche Ursache für die Entstehung von Eigenspannungen ist die beim Erstarren und Abkühlen eines Gussteils in unterschiedlich dicken Bereichen vorliegende inhomogene Temperaturverteilung und Gussteilkontraktion [1].

Im Zusammenhang mit den abkühlungsbedingten Eigenspannungen sind auch Umwandlungseigenspannungen zu sehen. Ursache dieser Eigenspannungen, die die abkühlungsbedingten überlagern, ist eine inhomogene bzw. ungleichmäßige Gefügewandlung (z. B.  $\gamma$  in  $\alpha$  bei Gusseisen zwischen ca. 800 und 750 °C) mit dabei auftretenden Volumenveränderungen [1].

Die wesentlichsten Einflussgrößen auf die Entstehung von Eigenspannungen in Gussteilen sind:

- > Gussteilgeometrie (Wanddickenunterschiede),
- > Ausleertemperatur/-zeitpunkt des Gussteils,
- > Schrumpfungshinderung durch Kerne (Kernfestigkeit und Kernzerfallseigenschaften),
- > E-Modul des Werkstoffes, d. h. bei Gusseisen primär die Graphitstruktur und -menge,
- > Gussnachbehandlung, wie z. B. Strahlen.

Von der oben genannten Auswahl an Einflussgrößen kann die Gießerei selbst die Ausleertemperatur, die Schrumpfungshinderung durch die Form und Kerne, die Abkühlungsbedingungen sowie die Gussnachbehandlung beeinflussen.

Über den Einfluss der Ausleertemperatur aus der Gießform auf die Eigenspannungen bestehen überwiegend einheitliche Auffassungen. Das Heißausleeren von Gussstücken oberhalb 730 °C ruft die höchsten Eigenspannungen hervor [2, 3]. Auch in [4] wurde für verschiedene Gusseisensorten festgestellt, dass ein Ausleeren zwischen ca. 700 und 900 °C deutlich höhere Gusseigenspannungen erzeugt.

Der Einfluss unterschiedlicher Kernformstoffe auf die Eigenspannungen wurde bisher wenig untersucht. Dass Formstoffe auf die Entstehung von Spannungen im Gussstück und damit in Verbindung auf die Rissbildung Einfluss haben, wird schon in der Arbeit E-85 [5] des Instituts für Gießereitechnik gGmbH (IfG), Düsseldorf, herausgestellt. In [6] wurde ermittelt, dass Kerne mit hoher Druckfestigkeit hohe Eigenspannungen hervorrufen. In einem früheren Projekt des IfG zu Eigenspannungen [4] wurde nachgewiesen, dass Spannungsgitter aus GJS-400-15, die mit Cold-Box-Kernen hergestellt wurden, im dicken Mittelsteg doppelt so hohe Zugeigenspannungen aufweisen, wie die mit Nassgussand gegossenen (91 bzw. 43 N/mm<sup>2</sup>). Begründen lässt sich das damit, dass Cold-Box-Kerne bei Raumtemperatur eine Druckfestigkeit von ca. 300 bis 500 N/cm<sup>2</sup> und Nassgussand eine Druckfestigkeit von ca. 20 bis 30 N/cm<sup>2</sup> aufweisen. Die Cold-Box-Kerne sorgen für eine starke Schrumpfungshinderung des Gitters vor allem in der ersten Zeit der Abkühlung. Andere praxisrelevante Bindersysteme bzw. Herstellungsbedingungen von Kernen (Resol-Binder, Verwendung von Additiven, verschiedene Binderanteile), die andere Druckfestigkeiten aufweisen bzw. verursachen, wurden bisher noch nicht untersucht.

## KURZFASSUNG:

Die Kenntnis und Minimierung von Eigenspannungen in Gussstücken ist nach wie vor eine notwendige und anspruchsvolle Aufgabenstellung. Im Rahmen eines von der AiF geförderten Forschungsprojektes wurden die Einflüsse von Kernformstoffen, von Entfestigungsvorgängen und einer Auslagerung auf das Niveau der Eigenspannungen in Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) und Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL) untersucht. Die in den Versuchen berücksichtigten Kernformstoffe übten einen deutlichen Einfluss auf das Eigenspannungsniveau der gegossenen Probekörper aus. Auslagerungsversuche bei Raumtemperatur von GJL-Proben zeigten keinen nachweisbaren zeitabhängigen Abbau von Eigenspannungen. An GJS- und GJL-Probestäben wurde das visko-plastische Werkstoffverhalten ermittelt und in eine Erstarrungs- und Eigenspannungssimulationssoftware implementiert. Die Ergebnisse der Eigenspannungssimulation unter Berücksichtigung dieses visko-plastischen Werkstoffverhaltens lagen deutlich näher an den experimentell ermittelten Eigenspannungswerten als die unter bisher üblicher Berücksichtigung des elasto-plastischen Werkstoffverhaltens.

Der Einfluss durch Langzeitauslagern oder Rütteln von Gussstücken auf den Eigenspannungszustand wurde bisher überwiegend verneint [7-9]. Trotzdem wird vor allem in jüngerer Zeit über einen Einfluss des Auslagerns und von Vibrationsbehandlungen [10] aus der Praxis berichtet. Eine qualitative Erkenntnis aus der IfG-Arbeit [4] war, dass sich die mit der Neutronenbeugung gemessenen Mikroeigenspannungen in Bremsscheiben aus GJL im Verlauf mehrerer Wochen direkt nach dem Gießen deutlich verändern.

Dass es bei GJL nach dem Gießen mit fortschreitender Zeit zu mikrostrukturellen Veränderungen kommt, wurde im Rahmen von [11] gezeigt. Die Resonanzfrequenz verschiedener Gussstücke stieg vor allem in den ersten Tagen nach dem Gießen stark an. Es wird vermutet, dass die Relaxation von Eigenspannungen hiermit in Verbindung steht, ohne dass dazu nähere Untersuchungen erfolgten. Neuere Un-

tersuchungen geben für diese Resonanzfrequenzänderungen allerdings Alterungsvorgänge im Gusseisen an, bei denen sich feine Nitride ausscheiden [12].

Bei Gusseisen mit Lamellengraphit nimmt mit zunehmendem E-Modul das Eigenspannungsniveau zu [4, 13]. Dieser Kennwert steht direkt mit der Ausbildung des Lamellengraphits (Länge, Anordnung) im Zusammenhang. Feiner D-Graphit ergibt einen höheren E-Modul und damit höhere Eigenspannungen als grober A-Graphit.

## Messverfahren für Eigenspannungen an Gusseisen

Eine Übersicht über praxisrelevante Messverfahren, die u. a. für Messungen an Gussstücken eingesetzt werden können, stellt Bild 1 dar.

Für Messungen an Gussstücken aus Gusseisen eignen sich das Bohrloch-, Ring-Kern-

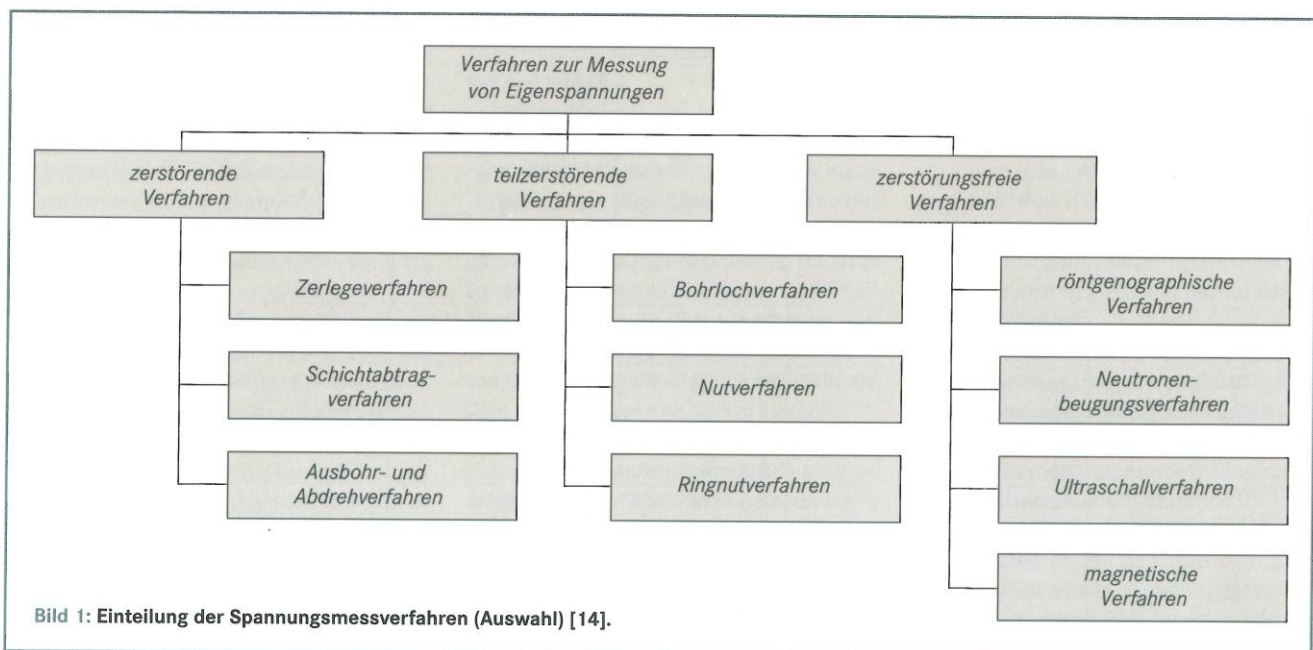


Bild 1: Einteilung der Spannungsmessverfahren (Auswahl) [14].

und Zerlegeverfahren. Nachteil der zerstörungsfreien röntgenographischen und Neutronenbeugungsverfahren ist der hohe apparative Aufwand, Anforderungen an die Zugänglichkeit der Messstelle sowie die Tatsache, dass nur Eigenspannungen einer Phase gemessen werden können [1, 4, 15]. Bei zunehmender Grobkörnigkeit des Werkstoffes nimmt darüber hinaus der Messfehler der Beugungsverfahren zu [16].

Weit verbreitet ist das Messen der Eigenspannungen in Gussstücken mit dem Zerlegeverfahren sowie mit dem Bohrlochverfahren [15, 17-20]. Beide Verfahren gebrauchen die beim Sägen bzw. Bohren auftretende elastische Rückfederung entsprechend der Störung des Kräftegleichgewichts zur Ermittlung der Eigenspannung I. Art. Die Genauigkeit des Bohrlochverfahrens liegt unter Normalbedingungen (Prüfung von Stahl) bei ± 20 MPa bis ± 30 MPa [21]. Für das Zerlegeverfahren bei Gusseisenwerkstoffe liegen keine speziellen Angaben dazu vor.

Um den zeitlichen Verlauf der Eigenspannungen in Bauteilen zu bestimmen, kommen nur zerstörungsfreie Messverfahren infrage, da die Mehrfachmessungen in genau einer Position durchgeführt werden müssen. Die Beugungsverfahren haben den Nachteil, dass sie nur Mikroeigen-

spannungen des Ferrits liefern und zudem messtechnisch aufwendig sind.

Eine weitere Möglichkeit der zerstörungsfreien Eigenspannungsmessung bieten die magnetischen Verfahren. Sämtliche elektromagnetischen Prüfgrößen (u. a. die Koerzitivfeldstärke  $H_{cJ}$ ) reagieren empfindlich auf mechanische Verspannungen und Gefügeunterschiede.

### Simulation von Gusseigenspannungen

Die Berechnung abkühlungsbedingter Gusseigenspannungen basiert auf Modellen, welche die durch die Temperaturbelastung während des Gießvorganges hervorgerufenen Spannungen und Verformungen beschreiben. Der Stand der Technik der Eigenspannungs- und Verzugssimulation für Gussteile basiert überwiegend auf der Anwendung des elasto-plastischen Modellansatzes, bei dem für das Materialverhalten ein zeitunabhängiges Spannungs-Dehnungs-Verhalten berücksichtigt wird. Dazu wird die temperaturabhängige Spannungs-Dehnungskurve aus Zugversuchen herangezogen.

Eine wesentliche Voraussetzung zur Berechnung von thermisch bedingten Eigenspannungen unter Berücksichtigung elas-

to-plastischen Materialverhaltens ist folglich die Verfügbarkeit entsprechender temperaturabhängiger Werkstoffkennwerte (E-Modul, Dehn- bzw. Streckgrenze, Verfestigungskoeffizient im Bereich der plastischen Verformung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms sowie Wärmeausdehnungskoeffizient). Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden derartige Werkstoffkennwerte für GJL und GJS am IfG bereits ermittelt [4].

Beim elasto-plastischen Ansatz wird der zeitabhängige Spannungsabbau bei erhöhten Temperaturen durch Belastungen unterhalb der Streckgrenze des Werkstoffes infolge Kriechens nicht berücksichtigt. In der Realität dürften gebildete Eigenspannungen jedoch durch gleichzeitig ablaufende Entfestigungs- bzw. Relaxationsvorgänge (Kriechen) weiter abgebaut werden. Dieser Vorgang wird umso gravierender sein, je langsamer das Gussteil abkühlt.

Eine Verbesserung der Berechnungsergebnisse für die Eigenspannungssimulation wird daher durch die Berücksichtigung visko-plastischer Modelle und Werkstoffdaten erwartet, die einen Spannungsabbau durch Kriechen des Gussteilwerkstoffes nach der Erstarrung berücksichtigen.

Tabelle 1: Form- und Kernformstoffvariationen und deren Zusammensetzung.

Form	Bindersystem	Grundstoff/Additiv	Lfd. Nr.	Rezeptur Härter/Harz/Additiv [Gew. in %]	
Außenform	kaltselfthärtend Phenolharz (PEP Set)	Sand A (AFS 45, MK 0,32 mm) kantengerundetes Korn		0,6/0,6/0	
Kerne	gashärtend Cold-Box-PUR	Sand A (AFS 45, MK 0,32mm) kantengerundetes Korn	3	0,7/ 0,7/0	
		Sand B (AFS 50, MK 0,30 mm) Neusand, eckiges Korn	2	0,7/ 0,7/0	
	gashärtend Cold-Box-PUR mit Additiv	Sand A (AFS 45, MK 0,32 mm) kanten- gerundetes Korn	Additiv A (anorganisch) Quarz/Graphit	6	0,63/0,63/3,2
			Additiv B (anorganisch) Fe-/Al-/Ti-Oxid	4	0,75/0,75/7,0
		Additiv C (organisch)	5	0,63/0,63/0,8	
	gashärtend, Resol-CO <sub>2</sub>	Sand A (AFS 45, MK 0,32mm) kantengerundetes Korn	1	3,0	
	gashärtend, Wasserglas-CO <sub>2</sub>	Sand A (AFS 45, MK 0,32mm)	10	3,0	
	kaltselfst- härtend	Sand A (AFS 45, MK 0,32mm) kantengerundetes Korn	8	1,0/ 0,4	
	Furanharz	Regenerat Fa. A (MK 0,30 mm)	9	1,0/ 0,4	
	kaltselfst- härtend Phenolharz (Pep-Set)	Sand A (AFS 45, MK 0,32mm) kantengerundetes Korn	7	0,6/ 0,6	

## Versuchsdurchführung und Ergebnisse

### Eigenspannungsbildung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kernformstoffe

**Auswahl der Kernformstoffe.** Ein wesentlicher Untersuchungsgegenstand des Forschungsprojektes war die Ermittlung des Einflusses von unterschiedlichen Kernformstoffen auf die Eigenspannungen in Gussteilen aus GJS infolge von Schrumpfungsbegrenzung. Dabei sollte das Zerfallsverhalten von gebräuchlichen Bindersystemen und Formgrundstoffen berücksichtigt werden. In den Versuchen wurden Kerne aus verschiedenen Kernformstoffvarianten in die Gießformen für die Probekörper (Spannungsgitter) eingelegt. Entscheidend für den thermisch bedingten Zerfall und den Widerstand gegen die Schrumpfung bei der Abkühlung von Gussteilen sind:

- > Erweichungsphasen der Binder beim Aufheizen,
- > Pyrolyse der chemischen Binder,
- > Binderbrückenauflösung,
- > Kornform und Gleiteigenschaften des Formgrundstoffs,
- > Hohlraumvolumen, Packungsdichte oder Platzhalterstoffe,
- > Beeinflussung der Abkühlbedingungen durch die Wärmeleitfähigkeit der Formgrundstoffe und durch die Formstoffzusätze.

Tabelle 1 listet die Formgrundstoffarten und Binderrezepturen der 10 getesteten selbst- oder gashärtenden Kernformstoffe auf.

### Herstellung der Kerne und Prüfkörper.

Die Kernformstoffmischungen wurden in einem Schwingmischer hergestellt. Zu jeder Kernformstoffvariante wurden zur Charakterisierung der Mischungen Prüfkörper (Biegeriegel) hergestellt. Die Herstellung der Biegeriegel erfolgte auf unterschiedliche Art. Kernformstoffe zum Einsatz in der Kernschießmaschine wurden durch Schießen in eine 4-fach-Kernbüchse erstellt, Kernformstoffe zur manuellen Verarbeitung wurden auf dem +GF+-Rammgerät der Georg Fischer AG, Schaffhausen, Schweiz, mit 3 Rammschlägen verdichtet.

Als Formgrundstoff wurde Quarzsand (AFS 45, MK 0,32 mm) verwendet. Zum Vergleich des Einflusses der Kornform wurde ein Sand mit eckiger Kornform (AFS 50, MK 0,30 mm) eingesetzt. Die Festigkeiten liegen im Rahmen der für die unterschiedlichen Mischungen üblichen Werte (zwischen 173 und 353 N/mm<sup>2</sup>).

**Gießversuche mit dem Spannungsgitter.** Mit dem Spannungsgitter wird ein Probekörper verwendet, der bereits in einer

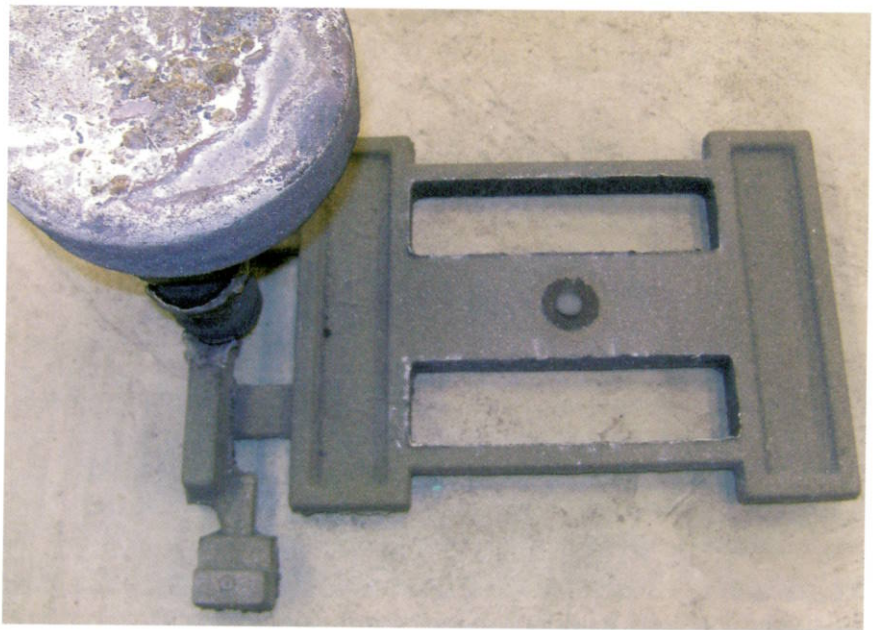


Bild 2: Spannungsgitter mit Einguss und angegossenem Stufenkeil.

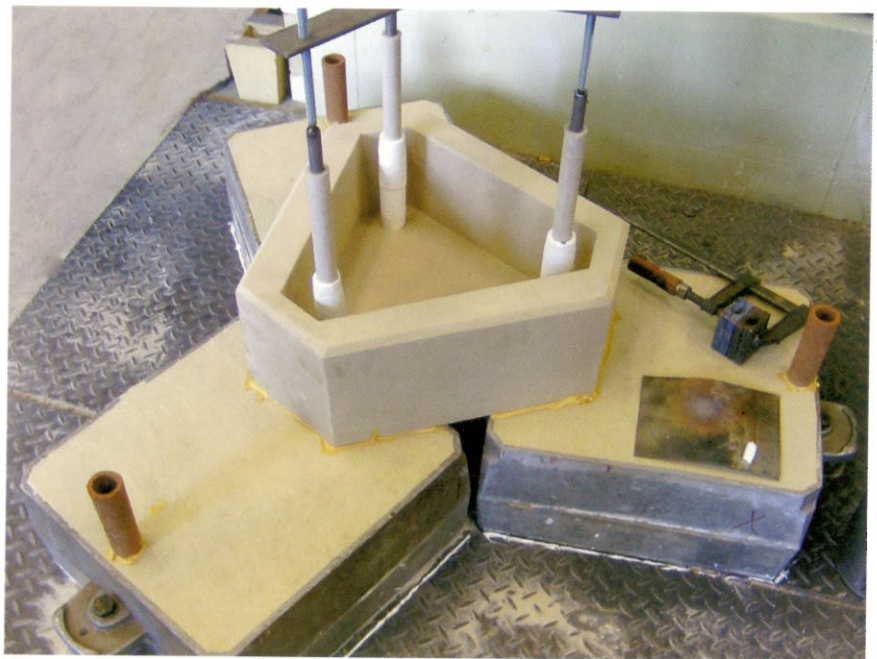


Bild 3: Ansicht der symmetrisch angeordneten Gießeinrichtung mit aufgesetztem Gießstümpel mit drei Stopfen.

früheren IfG-Forschungsarbeit [5] eingesetzt wurde. Es handelt es sich um einen Gusskörper, bei dem die Aussparungen zwischen einem Mittelsteg und den Außenstegen durch Kerne gebildet werden. Die Gießform besteht aus einem Unter- und Oberkasten mit den eingelegten Kernen. Der mittlere breite Steg sowie die beiden äußeren dünnen Stege haben Querschnitte von 70 x 25 mm<sup>2</sup> bzw. von 12,5 x 25 mm<sup>2</sup>.

Die Gießformen wurden einheitlich aus dem selbsthärtenden Formstoff Pep-Set gefertigt (ungeschlichtet). In die Kerntaschen wurden die Einlegekerne aus den ausgewählten ungeschlichteten Formstoffvarianten (siehe Tabelle 1) eingesetzt. In Bild 2 ist ein ausgepacktes Spannungsgitter zu sehen.

Zur metallographischen Vorprüfung wurde an jeden Abguss ein Stufenkeil angegossen (Bild 2, unten links). Alle Abgüsse wurden nach frühestens 16 Stunden ausgepackt und ohne mechanische Belastung durch Drahtbürsten von anhaftendem Formstoff befreit.

Es wurden jeweils mit einer Schmelze drei Spannungsgitter gegossen. Dazu wurde eine sternförmig aufgebaute Gießanordnung eingesetzt, bei der ein aufgesetzter Eingusstümpel mit 3 Stopfen die fertige, magnesiumbehandelte und geimpfte Schmelze aufnahm und bei Erreichen der Gießtemperatur durch Ziehen der Stopfen alle 3 Gießformen schnell und gleichzeitig gefüllt werden konnten (Bild 3).

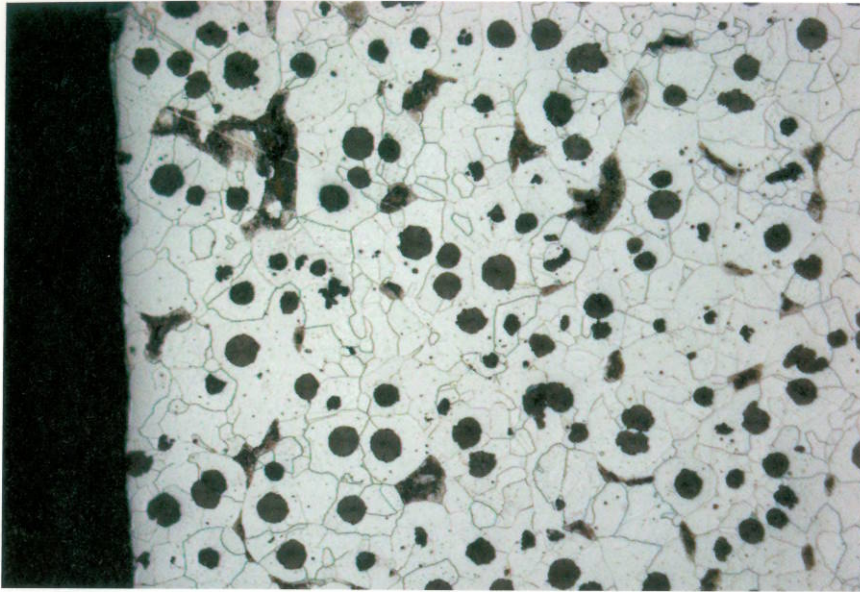


Bild 4: Geätztes Gefüge im Mittelsteg eines Spannungsgitters, direkt unterhalb der Position der Dehnmessstreifen.

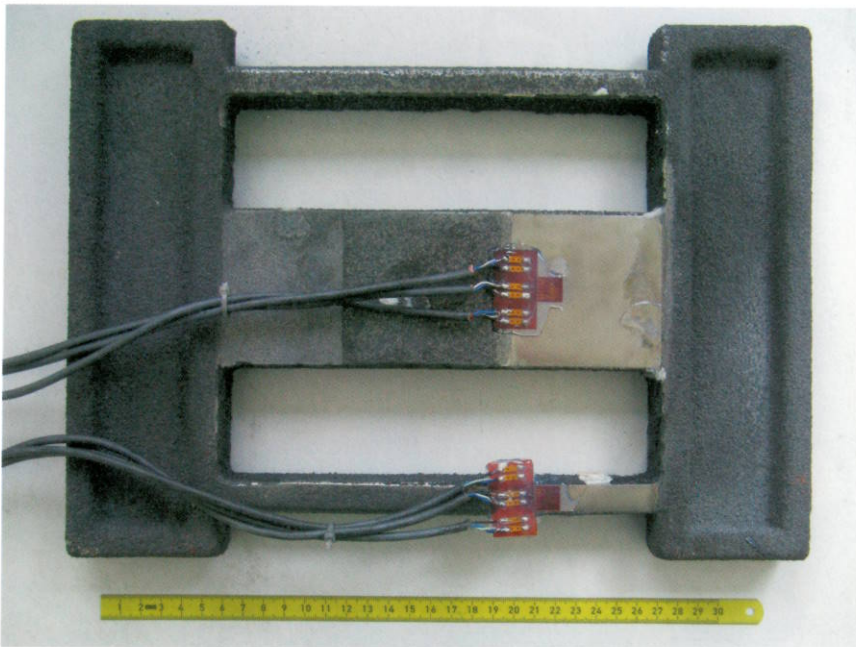


Bild 5: Spannungsgitter mit den beiden aufgeklebten DMS-Rosetten vor der Prüfung.

Die 10 verschiedenen Schmelzen (hergestellt mit dem Sandwichverfahren) wurden mit folgenden Parametern hergestellt:

- > Masse-% C: 3,60 bis 3,66, -% Si: 2,31 bis 2,49, -% Mn: 0,030 bis 0,050, -% Cu: 0,022 bis 0,029, -% Mg: 0,032 bis 0,039
- > Gießtemperatur: 1408 bis 1430 °C

**Chemische und metallographische Untersuchungen.** Der Freigabe der untersuchten Spannungsgitter ging jeweils eine Untersuchung der chemischen Zusammensetzung und des Gefüges (im Stufenkeil) voraus.

Nach den durchgeführten Eigenspannungsmessungen nach dem Zerlegeverfahren wurden die Spannungsgitter selbst im

Bereich der Messungen (im Mittelsteg) auf die tatsächlichen örtlichen Gefügebestandteile untersucht. Es wurde generell ein porrenfreies und überwiegend ferritisches Grundgefüge (Ferritanteil von 81,7 bis 85,8 %) mit Graphitausscheidungen der Graphitform V + VI (Anteil von 96,0 bis 98,7 %) festgestellt. Das geätzte Gefüge in einem der Mittelstege, direkt unterhalb der Position der Dehnmessstreifen, zeigt beispielhaft Bild 4.

**Eigenspannungsmessungen nach der Zerlegemethode.** An den gegossenen 30 Spannungsgittern wurden die Eigenspannungen nach der Zerlegemethode im breiten und dünnen Mittelsteg gemessen. In Bild 5 ist ein noch nicht gesägtes Span-

nungsgitter mit den beiden aufgeklebten DMS-Rosetten dargestellt.

**Messpunkte und Vorgehen.** Zur Vorbereitung der Messungen wurden die auf der Unterkastenseite liegenden Messstellen nach örtlichem Abfräsen der Gusschaut (Abstand der Messstelle zum Rand des Querjoches ca. 35 mm) durch Feinschleifen geglättet und anschließend die DMS-Rosetten (Anordnung 0°/45°/90°, Typ 1-RY91-6/120) aufgeklebt. Während des Sägens eines dünnen und eines dicken Steges wurden die Dehnungsänderungen (Widerstandsänderungen) infolge des Auslösens der Eigenspannungen erfasst. Die Eigenspannungen (Hauptnormalspannungen) wurden aus den erfassten Dehnungen wiederum mit einem E-Modul von 160 000 N/mm<sup>2</sup> berechnet.

**Ergebnisse.** Je Spannungsgitter gibt es ein Messergebnis aus dem breiten und dem dünnen Steg. Aus den Einzelergebnissen der breiten Stege wurden, nach Kernformstoffvarianten getrennt, separate Spannungsmittelwerte (aus jeweils 3 Einzelwerten) in einer zusammenfassenden Graphik dargestellt. Die Ergebnisse aus den dünnen Stegen sind dem Abschlussbericht des Projektes [22] zu entnehmen.

Im Bereich des breiten Mittelstegs wurden jeweils Zugspannungen mit unterschiedlichen Beträgen (Bild 6) ermittelt. Die Spanne zwischen den niedrigsten und den höchsten Mittelwerten der Zugspannungen liegt bei 40 N/mm<sup>2</sup>. Insgesamt ist bei diesen Vergleichen zu berücksichtigen, dass die Unterschiede zwischen minimalem und maximalem Einzelwert je nach Kernformstoff 3 bis 54 N/mm<sup>2</sup> betragen.

#### Untersuchungen zur Spannungsrelaxation bei GJL

Diese Untersuchungen wurden mit dem zerstörungsfrei arbeitenden 3MA-Verfahren (Mikromagnetische Multiparameter Mikrostruktur- und Spannungsanalyse) durchgeführt. Es bietet die Möglichkeit, Eigenspannungen zerstörungsfrei an einer gleichbleibenden Messposition zu messen. Auf diese Weise konnte der Eigenspannungsverlauf in den Spannungsgittern in Abhängigkeit von der Auslagerungszeit bei Raumtemperatur charakterisiert werden. Das 3MA-Verfahren basiert darauf, im oberflächennahen Volumen der Probe ein elektromagnetisches Wechselfeld zu erzeugen. Die dabei erfassten Prüfgrößen, insbesondere die Koerzitivfeldstärke  $H_{c1}$ , verändern sich in Abhängigkeit von den Eigenspannungen.

Die Messungen wurden beim Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP), Saarbrücken, durchgeführt. Die Bereitstellung der vier Spannungsgitter im Werkstoff GJL-250 erfolgte durch

das IfG (Herstellung mit Formen und Kernen aus Pep-Set-Sand). Die Lagerzeit nach dem Gießen und Abkühlen der Gussteile war in einem Prüfplan festgeschrieben, der eine Sofortprüfung sowie Prüfungen nach 2, 3, 7, 14, 63 und 126 Tagen vorsah. Die Messungen erfolgten in vier Positionen am breiten Steg (Positionen 1 bis 3 auf der Unterkastenseite und Position 4 auf der Oberkastenseite).

Den Prüfungen gingen Parameterstudien und Kalibrierungen voraus. Anschließend erfolgten die Relaxationsmessungen an den Spannungsgittern. Genauere Ausführung zu den Messungen mit dem 3MA-Verfahren sind dem Abschlussbericht des Projektes [22] zu entnehmen.

Nach Abschluss der Datenaufnahme am 126. Tag nach dem Abgießen wurden die Mittelstege aus den Spannungsgittern freigeschnitten und an der Position 2 die magnetischen Prüfgrößen erneut gemessen. Anschließend wurden die Mittelstege unter Schutzgas bei 550 °C spannungsarm geglüht. Abschließend wurden die magnetischen Prüfgrößen an allen spannungsarm geglühten Mittelstegen an allen 4 Positionen erneut aufgenommen.

In Bild 7 ist beispielhaft der Verlauf der Prüfgröße  $H_{cp}$  (bei 150 Hz, 20 A/cm) in den unterschiedlichen Zeitabständen nach dem Abgießen sowie die Veränderung der Prüfgröße nach dem Freischnneiden und nach dem Spannungsarmglühen dargestellt.

In Abhängigkeit von der Lagerzeit wurde bei keinem der Spannungsgitter eine signifikante Änderung der spannungsempfindlichen magnetischen Prüfgröße  $H_{cp}$  gemessen. Ein Einfluss von Gefügeabweichungen auf das Ergebnis kann aufgrund der gleichbleibenden Messstelle ausgeschlossen werden. Daraus lässt sich schließen, dass im Verlauf der 126 Tage keine Spannungsrelaxation in den Proben aus GJL stattgefunden hat. Nach dem Freischnneiden und Spannungsarmglühen der Mittelstege konnte demgegenüber bei allen Spannungsgittern ein deutlicher Anstieg der Prüfgröße  $H_{cp}$  gemessen werden. Diese Änderung lässt sich eindeutig auf den zu erwartenden Abbau von Eigenspannungen infolge des Freischnneidens und Glühens zurückführen.

### Charakterisierung des Werkstoffverhaltens bei hohen Temperaturen

Für die angestrebte Berücksichtigung des visko-plastischen Werkstoffverhaltens bei der Simulation der Eigenspannungen war die Ermittlung des zeit-, temperatur- und lastabhängigen Dehnungsverhaltens notwendig. Ein Bestandteil der Untersuchungen war daher die Charakterisierung des Werkstoffverhaltens der Gusseisenwerkstoffe GJS-400-15 und GJL-250 bei er-

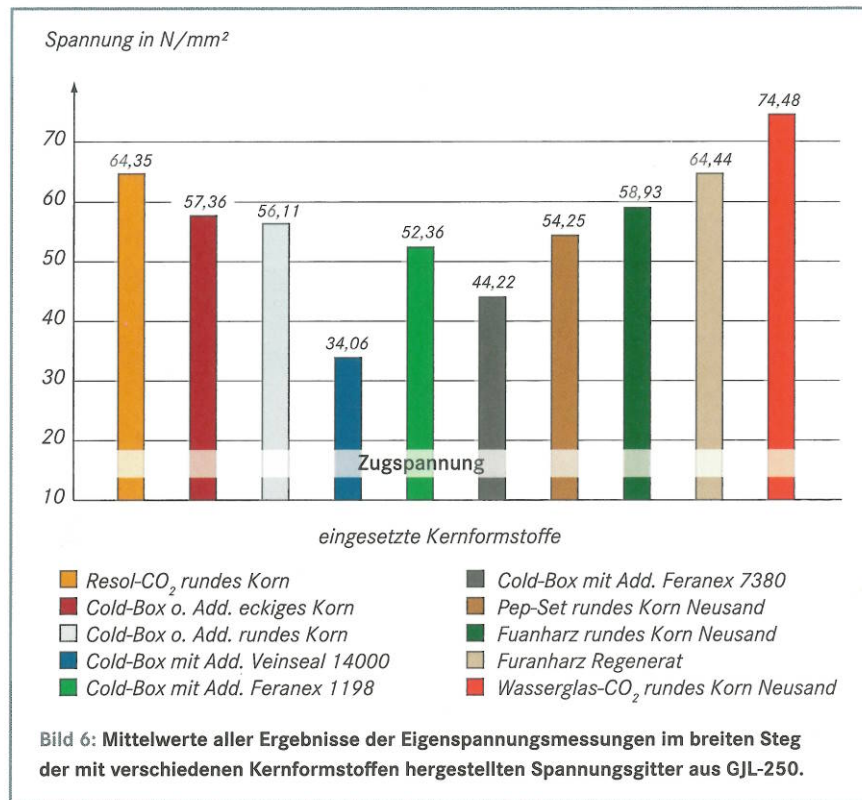


Bild 6: Mittelwerte aller Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen im breiten Steg der mit verschiedenen Kernformstoffen hergestellten Spannungsgitter aus GJL-250.

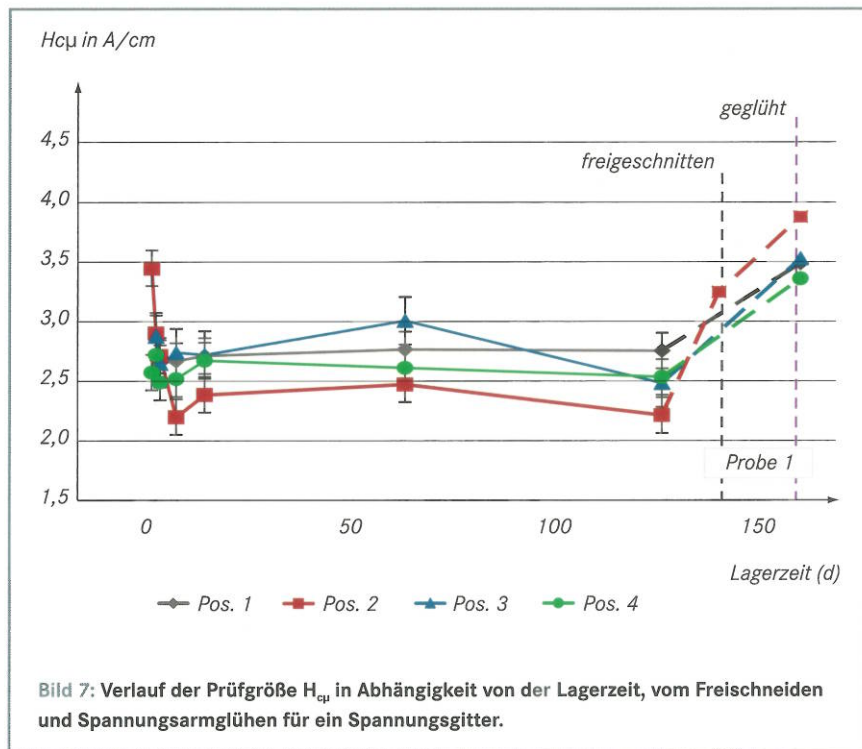


Bild 7: Verlauf der Prüfgröße  $H_{cp}$  in Abhängigkeit von der Lagerzeit, vom Freischnneiden und Spannungsarmglühen für ein Spannungsgitter.

höhten Temperaturen im Rahmen von Kurzzeitkriechversuchen. Das Dehnungsverhalten bei hohen Temperaturen wurde anhand von Werkstoffproben im Rahmen der Kriechversuche ermittelt.

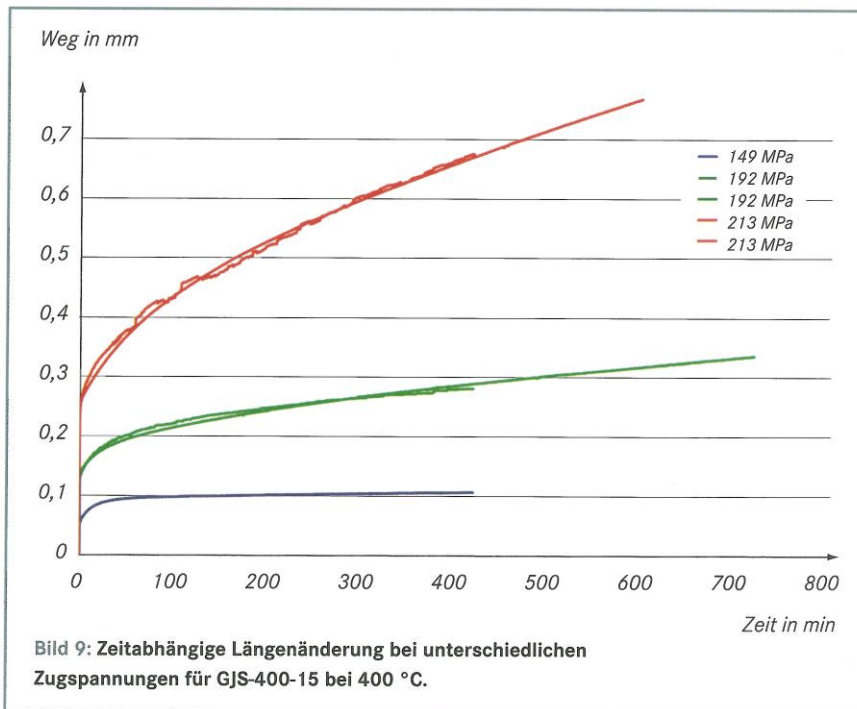
**Herstellung der Werkstoffproben.** Zur Herstellung der Probekörper kam eine Modelleinrichtung zum Einsatz, bei der mit einem Abguss 8 Y2-Proben gegossen werden konnten (Wanddicke 25 mm), aus de-

nen dann jeweils 2 übereinanderliegende Proben herausgearbeitet wurden. Alle Schmelzen wurden in einem 150 kg-Induktionstiegelofen hergestellt. Dafür wurden Materialien eingesetzt, die anhand von Analysen speziell für die jeweilige Gusseisensorte ausgewählt wurden. Einzelheiten dazu sind [22] zu entnehmen.

**Chemische und metallographische Tests.** Die für die Kriechtests erforderlichen Pro-



**Bild 8: Ansicht der Zugprüfmaschine zur Messung des Kriechverhaltens (Zwick & Roell) mit Ofen und Dehnungsaufnehmer.**



**Bild 9: Zeitabhängige Längenänderung bei unterschiedlichen Zugspannungen für GJS-400-15 bei 400 °C.**

ben wurden im Rahmen mehrerer Abgüsse hergestellt. Die chemische Zusammensetzung der einzelnen Chargen und die jeweiligen Gefügestände wurden für eine Selektion vergleichbarer Gussproben herangezogen. Bei allen hergestellten GJS-Chargen lagen die Anteile von Graphit der Formen VI und V bei > 90 % und der Ferritanteil bei ≥ 80 %.

Der Graphit lag in den Proben der unterschiedlichen GJL-Chargen zu 60 % als A-Graphit vor, der Rest als E- und vereinzelt auch als D-Graphit.

Die Graphitgröße lag zwischen 4 und 7 (nach DIN EN ISO 945). Die Grundmasse bestand zu mehr als 95 % aus Perlit. Auch

bei diesen Werkstoffchargen war die gemeinsame Verwendung der Proben aus den verschiedenen Gießchargen und Probenlagen zulässig.

**Durchführung der Kurzzeitkriechversuche.** Die Versuchsdauer der Kurzzeitkriechversuche orientiert sich an der Abkühlungszeit eines typischen Gussteils in der Form zwischen 1000 und 400 °C. Diese Zeiten liegen je nach Gussstückmasse und -geometrie bei mehreren Stunden (Masse deutlich < 1 t). Für die Kriechversuche im Rahmen dieser Arbeit wurden Zeiten zwischen 1 und 7 h gewählt. Damit unterscheiden sich diese Zeiten deutlich

von den Zeiten typischer Langzeitkriechversuche (z. B. 10 000 h).

Die Belastungen bei den Kriechversuchen lagen zwischen 50 und 100 % der  $R_{p0,1}$ -Dehngrenze der jeweiligen Temperatur. Die Werte der  $R_{p0,1}$ -Dehngrenze wurden aus den Warmzugversuchen, die im Rahmen von [5] durchgeführt wurden, entnommen. Die Zeitdauer war gestaffelt nach Werkstofftyp und Versuchstemperatur. Die Längenänderungen wurden mit einem mechanischen Feindehnungsmesser ermittelt. Zum Einsatz kam eine Zugprüfmaschine mit einem regelbaren Ofen mit drei Heizzonen (Bild 8).

Bei den Kriechproben handelte es sich um Zugstäbe in Universalform nach DIN 50125 mit Schraubgewindekopf M20 mit den Abmessungen Ø 14 und LO 70 (B 14 x 70). Die Proben wurden mit einer Maximalgeschwindigkeit von 30 °C/min aufgeheizt. Nach dem Aufheizen und 10 min Temperaturengleich bei der jeweils gewählten Prüftemperatur erfolgten die Messungen mit abgestuften konstanten Belastungen.

**Ergebnisse: Werkstoff GJS 400-15.** Die Messungen wurden bei Temperaturen von 400, 500, 600, 700, 800, 900 und 1000 °C durchgeführt. Die Ergebnisse bei den Temperaturen 400 und 700 °C sind als Weg-Zeit-Verläufe in den verschiedenen Schaubildern dargestellt (Bilder 9 und 10). Sie zeigen die Längenänderung als Weg über der Zeit mit den angesetzten Belastungen bei der entsprechenden Prüftemperatur. Den Graphiken ist zu entnehmen, dass mit zunehmender konstanter Belastung und zunehmender Temperatur der Werkstoff stärker fließt.

Der Werkstoff GJS-400-15 zeigt zu Beginn der Belastung bei 400 °C in den ersten 1 bis 3 Stunden bei den unterschiedlichen Belastungen ein sogenanntes primäres Kriechen. Die Kriechprozesse werden durch eine anfängliche elastische oder elastisch-plastische Initialdehnung aktiviert. Im weiteren Verlauf stellt sich dann sekundäres Kriechen mit konstanter Kriechrate ein. Bei 700 °C geht das sekundäre Kriechen sehr schnell in das tertiäre Kriechen mit ansteigender Kriechrate bis zum Bruch über.

**Ergebnisse: Werkstoff GJL-250.** Die Prüfung der Proben des Werkstoffs GJL-250 erfolgte nach der zuvor bei GJS beschriebenen Vorgehensweise. Die Haltezeiten und Belastungsstufen wurden gestaffelt ausgeführt. Die Ergebnisse der Messungen bei den Temperaturen 400 und 700 °C sind als Weg-Zeit-Verläufe in den Bildern 11 und 12 dargestellt.

Der Werkstoff GJL-250 zeigt, ebenso wie GJS-400-15, zu Beginn der Belastung bei 400 °C in den ersten 1 bis 3 Stunden bei

den unterschiedlichen Belastungen primäres Kriechen. Die Kriechprozesse werden auch hier durch eine anfängliche elastische oder elastisch-plastische Initialdehnung aktiviert. Im weiteren Verlauf stellt sich dann sekundäres Kriechen mit konstanter Kriechrate ein. Bei 700 °C geht das sekundäre Kriechen in das tertiäre Kriechen mit ansteigender Kriechrate bis zum Bruch über. Der Übergang zum Bruch erfolgt sehr schnell.

Ebenso wie der Werkstoff GJS kriecht auch GJL, allerdings mit höheren Beträgen. Zwar ist die metallische Matrix des ausgewählten GJL perlitisch ausgebildet, was festigkeitssteigernd wirkt, aber hier spielt die Anordnung des ausgeschiedenen Kohlenstoffs als Lamellengraphit die dominierendere Rolle. Er unterbricht das Grundgefüge und fördert die Fließvorgänge, wahrscheinlich an den Graphitlamellenenden. Deutlich werden diese unterschiedlichen Kriechbeträge bei den Prüftemperaturen unterhalb des Austenitgebietes (< 800 °C).

Die Ergebnisse der Messungen im Rahmen der Kriechversuche wurden in ein visko-plastisches Werkstoffmodell eingearbeitet, um das thermo-mechanische Verhalten von Gusseisen während der Abkühlung im Bereich höherer Temperaturen durch zeitabhängige, d. h. visko-plastische Werkstoffgesetze zu simulieren.

### Eigenspannungsuntersuchungen an realen Gussstücken

Um das eingesetzte Werkstoffmodell an größeren Gussstücken zu verifizieren, wurden die Eigenspannungen in einem größeren Gussstück jeweils aus GJS und GJL aus dem Fertigungsprogramm der projektbegleitenden Gießereien simuliert. Diese Simulationsergebnisse werden mit vorher durchgeführten Eigenspannungsmessungen an den betreffenden Gussstücken verglichen.

### Pumpenanschlussplatte aus GJS-400-15.

#### Fertigungsbedingungen

Als Bauteil aus der Werkstoffgruppe GJS-400-15 wurde eine Pumpenanschlussplatte ausgewählt (Hydraulikguss, Gewicht ca. 17 kg). Dieses kompakte und massive Gussstück wird in Grünsand gefertigt, wobei die Kerne zur Gestaltung der Innenräume aus Maskenformstoff bestehen. Zur Erzielung einer gerichteten Erstarrung befindet sich an der Unterseite eine Kühlkokille. Die Gießtemperatur liegt bei 1400 °C und die Gießzeit beträgt 15,5 s. Nach dem Abguss durchläuft das Gussstück die Kühlstrecke. Die Entleerzeit liegt oberhalb von 150 min.

#### Eigenspannungsmessungen

Die geeigneten Messpunkte für die Eigenspannungsmessungen wurden vorab durch

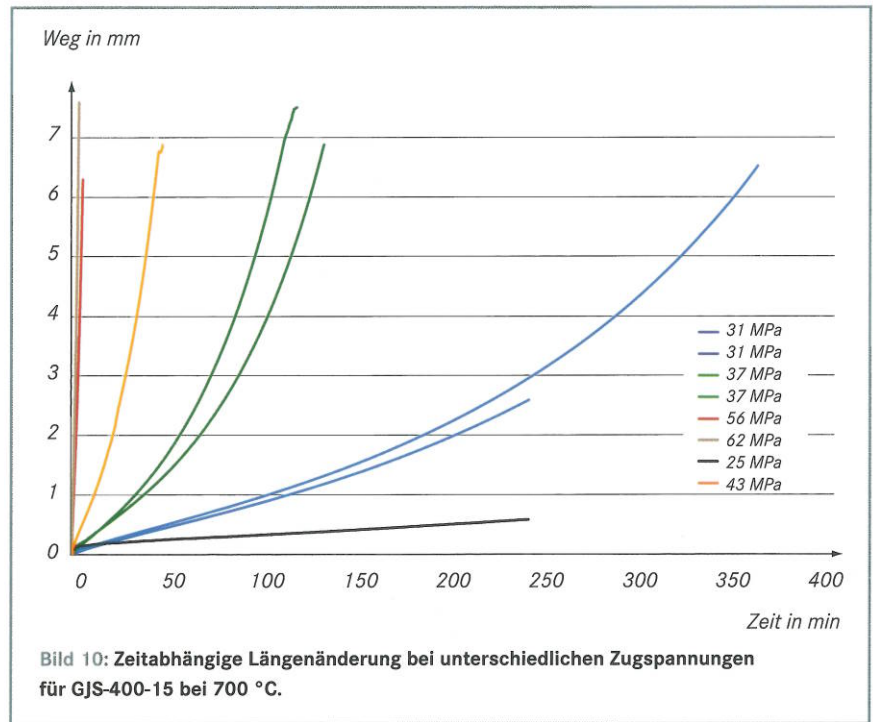


Bild 10: Zeitabhängige Längenänderung bei unterschiedlichen Zugspannungen für GJS-400-15 bei 700 °C.

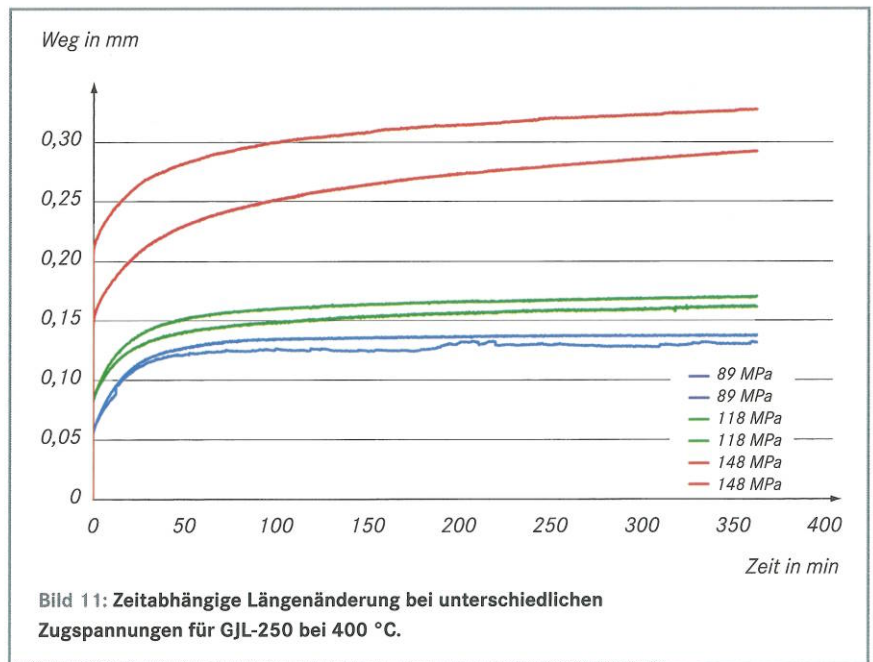


Bild 11: Zeitabhängige Längenänderung bei unterschiedlichen Zugspannungen für GJL-250 bei 400 °C.

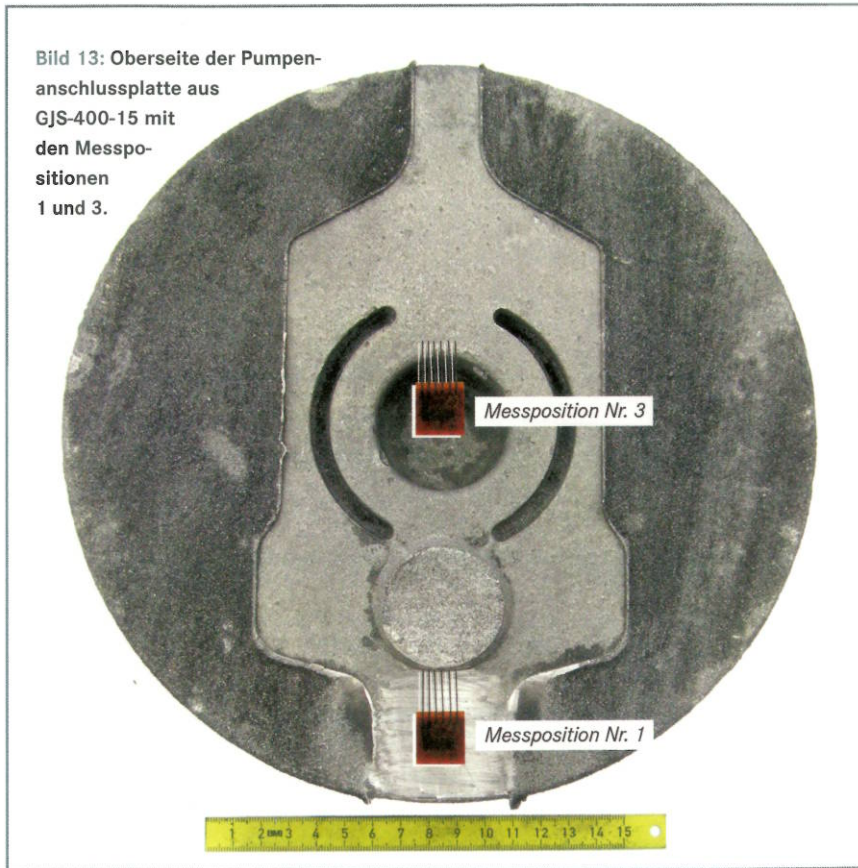
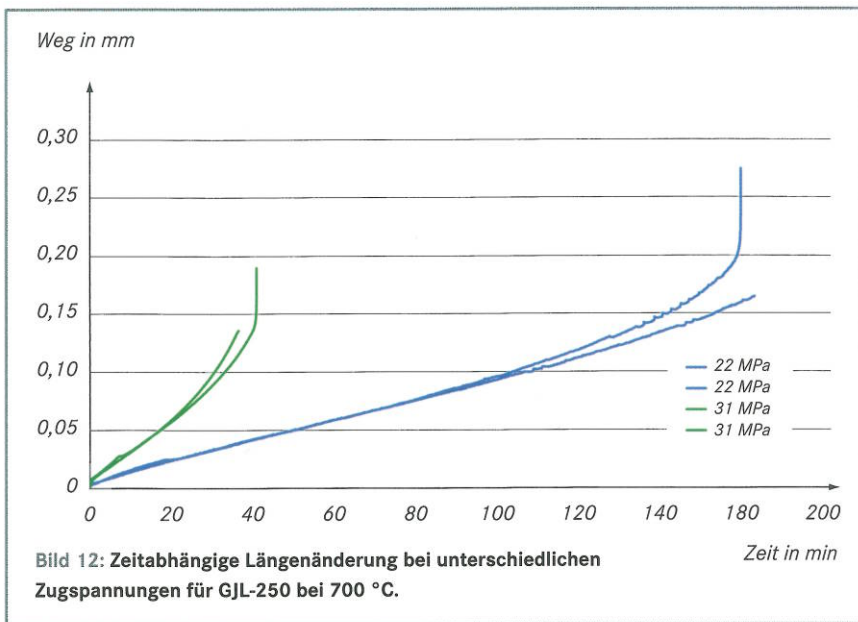
eine überschlägige Simulationsrechnung ermittelt und für das Bohrloch- und Zerlegerverfahren festgelegt.

Die Bilder 13 und 14 zeigen Ansichten der Ober- und Unterseite mit den Lagepositionen für die Eigenspannungsmessungen. Für das zunächst durchgeführte Bohrlochverfahren wurden die Positionen 1 und 6 ausgewählt. Bei der Bohrlochmethode erfolgt im zu untersuchenden Werkstückbereich die stufenweise Bohrung durch eine druckluftbetriebene Bohrturbine mit einer Drehzahl von mehr als 100 000 min<sup>-1</sup>. Der Durchmesser und die Tiefe der Bohrung betragen 1,5 mm. Im Bereich des Bohrloches befindet sich eine auf

die Werkstückoberfläche aufgeklebte Rosette mit drei Dehnmessstreifen, welche die beim Bohren ausgelösten Spannungen über die Dehnungsänderung erfassen. Die Dehnungsänderungen über die Bohrlochtiefe werden in die Spannungsverteilung (Hauptnormalspannungen) über die Bohrlochtiefe umgerechnet. Dazu wurde für GJS der E-Modul 160 000 N/mm<sup>2</sup> angesetzt. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte einheitlich in den Bohrlochtiefen zwischen 0,2 bis 0,9 mm (Mittelwertbildung aus Spannungseinzelwerten zwischen 0,2 und 0,9 mm).

Im Anschluss an die Bohrlochmessung erfolgte das Zerlegen mit Messungen in den





**Tabelle 2: Vergleich der Messergebnisse aus dem Zerlege- und Bohrlochverfahren an den Pumpenanschlussplatten (maximale/minimale Hauptnormalspannungen).**

Teil. Nr.	Pos. Nr.	Hauptnormalspannungen	
		Zerlegeverfahren in N/mm <sup>2</sup>	Bohrlochverfahren in N/mm <sup>2</sup>
1	1	-	+5,6/-15,5
	6	-	-9,0/-17,1
2	1	+3,8/-20,3	-
	6	-19,7/-54,5	-
3	1	+2,7/-8,0	+4,9/-18,3
	3	+22,7/+2,4	-
	6	-11,5/-17,4	-2,4/-9,5

Positionen 1, 3 und 6. Die Schnittpositionen wurden teilweise so gelegt, dass die Ergebnisse mit dem Bohrlochverfahren verglichen werden konnten. Die Ergebnisse dieser Eigenspannungsmessungen sind in **Tabelle 2** aufgeführt.

Insgesamt liegen an der Außenseite der Pumpenanschlussplatte überwiegend schwache Druckeigenspannungen vor. Entsprechend des Spannungsgleichgewichtes müssen im Inneren dieses Bauteils auch noch Zugeigenspannungen existieren. Die Ergebnisse aus Position 3 (Vertiefung) geben einen Hinweis darauf.

**Palette aus GJL-250.**

*Fertigungsbedingungen*

Als Bauteil aus der Werkstoffgruppe GJL-250 wurde eine runde Palette untersucht. Die Palette wurde von einer Gießerei konzipiert, abgeleitet aus der Geometrie eines realen Gussstückes, das sehr spannungsempfindlich ist. Die Palette hat einen Durchmesser von 90 cm und ist auf der Oberseite glatt und auf der Unterseite verrippt (**Bild 15**). Das Gewicht der Palette beträgt 275 kg. Bei einer Gießtemperatur von 1345 °C wurde mit einer Gießzeit von 30 s gegossen. Die Verweilzeit im Formkasten betrug 22 h.

*Eigenspannungsmessungen*

Anhand einer vorab durchgeführten Simulation wurden die Messpositionen ausgewählt. Auf der glatten Oberseite wurde der Messpunkt 1 festgelegt (**Bild 15**, Rückseite der abgebildeten Palette). Auf der Verrippung der Unterseite wurde der Messpunkt 3 in der Mitte der Palette auf einer dünnen Rippe sowie die beiden Messpunkte 5 auf dem Außenring festgelegt. In den verschiedenen Messpositionen wurden mehrere Messungen mit Abständen von ca. 10 mm zueinander durchgeführt. Die Messungen in Position 3 mit dem Zerlegeverfahren erfolgten durch Schlitzen der Rippe in der Umgebung der DMS (die zweite Messung mit dem Zerlegeverfahren erfolgte an einer zweiten Palette). Die Ergebnisse aller Eigenspannungsmessungen sind in **Tabelle 3** aufgeführt.

Im Bereich von Messpunkt 1 auf der Oberseite der Palette (in der Umgebung der Speiser) liegen deutliche Zugeigenspannungen vor. Demgegenüber liegen in der dünnen Verrippung (Messpunkt 3) höhere und am Außenrand (Messpunkt 5) niedrigere Druckeigenspannungen vor.

**Durchführung und Anpassung der Eigenspannungssimulation**

Im Rahmen des Projektes wurde durch den Softwareanbieter ein für die Wärmebehandlung von Aluminiumwerkstoffen entwickeltes visko-plastisches Werkstoffmodell für die Berechnung von Eigenspan-

nungen in Eisengussstücken erweitert. Grundlage dieses Modells ist unter anderem die Abhängigkeit der Kriechgeschwindigkeit von der Temperatur und anliegenden Spannung. Die Spannungsabhängigkeit wird dabei mit dem Nortons-Potenzgesetz und die Temperaturabhängigkeit mit dem Arrheniusgesetz beschrieben.

Wichtige Eingangskenngrößen für die Anwendung dieses Modells sind die Kriechkurven (Dehnung in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Temperaturen und Laststufen) der entsprechenden Gusswerkstoffe. Für die Implementierung wurden diese Kriechkurven durch mathematische Funktionen (die dann in die Simulationssoftware integriert werden) approximiert.

**Eigenspannungssimulation der Pumpenanschlussplatte aus GJS-400-15.** Die Geometrie der Pumpenanschlussplatte aus GJS wurde aus 3-D-CAD-Volumenmodellen des Herstellers erzeugt und in die Simulationssoftware importiert. Die Geometrie des Gießsystems sowie der Gießform wurde nach Angaben des Herstellers bzw. nach Zeichnungsvorgabe konstruiert.

Die Berechnung der Erstarrung und nachfolgenden Abkühlung ergab die in Bild 16 dargestellte Temperaturverteilung. Nach ca. 2 h Abkühlungszeit beträgt die Temperatur im Gussstück durchschnittlich 700 °C, d. h. es ist davon auszugehen, dass hier Kriechvorgänge zum Abbau der gebildeten Eigenspannungen beitragen können.

Die Eigenspannungen der Pumpenanschlussplatte wurden mit dem elasto-plastischen und dem visko-plastischen Werkstoffmodell unter Verwendung der Kriechkurven von GJS-400-15 berechnet. Die Bilder 17 und 18 zeigen die Verteilung der minimalen Hauptnormalspannungen auf der Oberseite des Gussstückes. Es ist zu erkennen, dass sich in Position 1 bei Berücksichtigung des visko-plastischen Werkstoffverhaltens die berechneten Druckeigenspannungen von ursprünglich -55 auf -30 N/mm<sup>2</sup> reduzieren. Die gemessenen Werte (Bohrloch- und Zerlegeverfahren) der minimalen Hauptnormalspannungen liegen bei -8 bis -20 N/mm<sup>2</sup>, d. h. deutlich näher an den Berechnungen nach dem visko-plastischen Werkstoffmodell.

Auf der Unterseite des Gussstückes werden in Verbindung mit der dort angelegten Kokille unter Berücksichtigung des elasto-plastischen Werkstoffverhaltens Druckeigenspannungen von -136 N/mm<sup>2</sup> errechnet (nicht im Bild). Nach Berechnung mit dem visko-plastischen Werkstoffmodell entstehen lediglich Druckeigenspannungen in Höhe von -29 N/mm<sup>2</sup>. Die Eigenspannungsmessungen bestätigen dieses deutlich niedrigere Niveau (Messposition 6) mit Werten zwischen -9 und -54 N/mm<sup>2</sup>.



Bild 14: Unterseite der Pumpenanschlussplatte aus GJS-400-15 mit Messposition 6.

Tabelle 3: Zusammenstellung aller Messergebnisse aus dem Zerlege- und Bohrlochverfahren an der Palette (maximale/minimale Hauptnormalspannungen).

Pos.- Nr.	Messung Nr.	Hauptnormalspannungen	
		Zerlegeverfahren in N/mm <sup>2</sup>	Bohrlochverfahren in N/mm <sup>2</sup>
1	1	-	+41,5/-3,1
	2	-	+21,0/-11,3
	3	-	+49,3/+28,8
	4	-	+44,2/-24,5
3	1	-	+3,2/-31,7
	2	-57,0/-68,0	-
	3	-26,3/-73,1	-
5	1	-	+18,6/-9,7
	2	-	-9,2/-23,5
	3	-	-2,2/-19,9

Die mit dem elasto-plastischen Werkstoffverhalten in Messposition 3 berechneten maximalen Hauptnormalspannungen betragen +49 N/mm<sup>2</sup> (nicht im Bild). Mit dem visko-plastischen Werkstoffmodell werden +23 N/mm<sup>2</sup> berechnet. Dies entspricht dem Ergebnis der Eigenspannungsmessung (vgl. Tabelle 2).

Diese vergleichenden Simulationsrechnungen und die Eigenspannungsmessungen verdeutlichen, dass bei der Abkühlung der zwar relativ kleinen, aber

kompakten Pumpenanschlussplatten durch Entfestigungs-, d. h. Kriechvorgänge, deutlich Eigenspannungen abgebaut werden.

**Eigenspannungssimulation der Palette aus GJL-250.** Die Geometrie der Palette aus GJL und darüber hinaus das Anschnitt- und Speisersystem wurden ebenfalls aus 3-D-CAD-Volumenmodellen des Herstellers erzeugt und in die Simulationssoftware importiert.

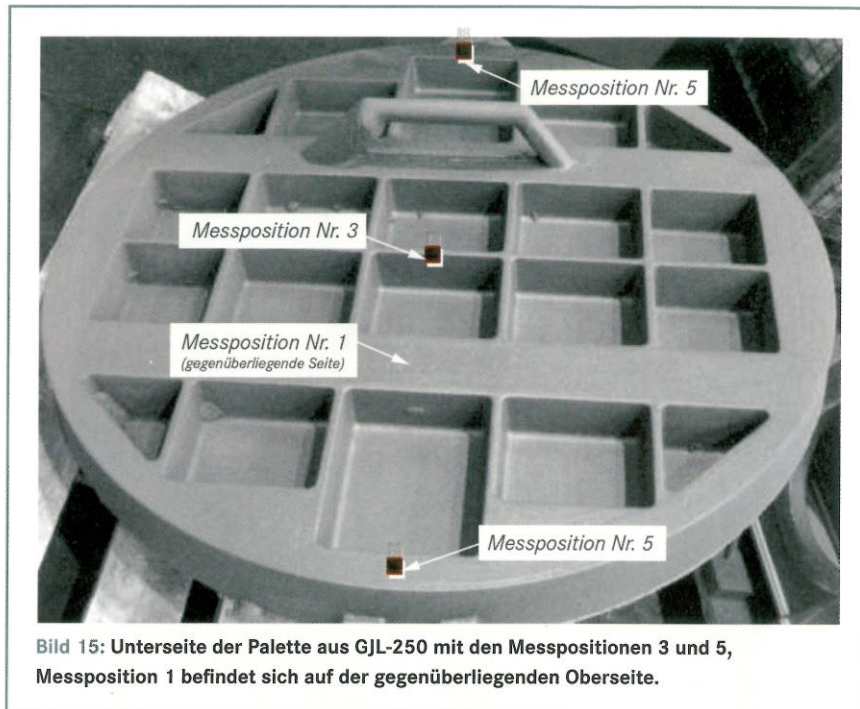


Bild 15: Unterseite der Palette aus GJL-250 mit den Messpositionen 3 und 5, Messposition 1 befindet sich auf der gegenüberliegenden Oberseite.

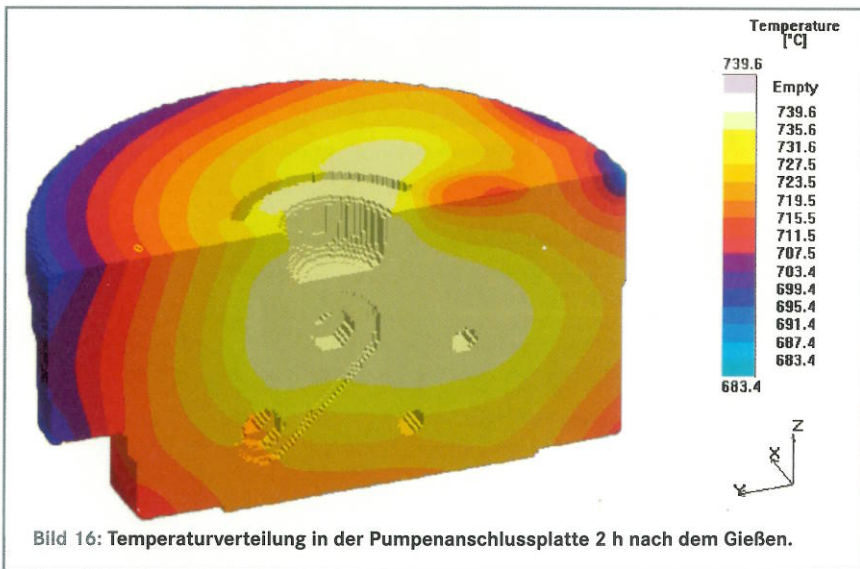


Bild 16: Temperaturverteilung in der Pumpenanschlussplatte 2 h nach dem Gießen.

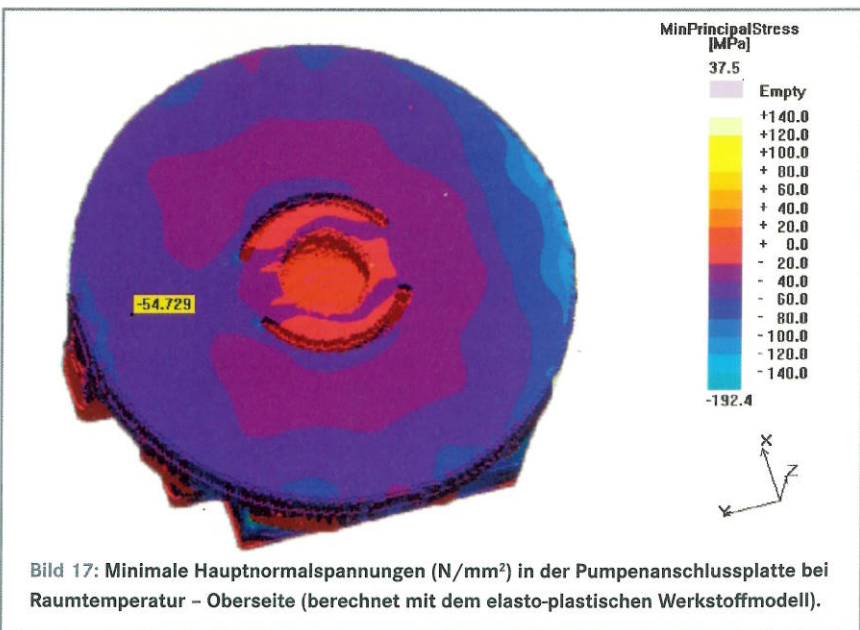


Bild 17: Minimale Hauptnormalspannungen (N/mm²) in der Pumpenanschlussplatte bei Raumtemperatur – Oberseite (berechnet mit dem elasto-plastischen Werkstoffmodell).

Die Berechnung der Erstarrung und nachfolgenden Abkühlung ergab die in Bild 19 dargestellte Temperaturverteilung nach 7 h. Nach diesen 7 h Abkühlungszeit liegt die Temperatur im Gussstück in den überwiegenden Bereichen zwischen 600 und 700 °C, d. h. es ist davon auszugehen, dass auch hier Kriechvorgänge zum Abbau der gebildeten Eigenspannungen beitragen können.

Die Eigenspannungen der Palette wurden mit dem elasto-plastischen und dem visko-plastischen Werkstoffmodell unter Verwendung der Kriechkurven von GJL-250 berechnet. Bild 20 zeigt die Verteilung der minimalen Hauptnormalspannungen auf der Unterseite der Palette. Es entstehen unter Berücksichtigung des elasto-plastischen Werkstoffverhaltens in Messposition 3 Druckeigenspannungen von -100 N/mm². Die Berechnung mit dem visko-plastischen Werkstoffmodell ergab lediglich -2 N/mm² Druckeigenspannungen (Bild 21). Die Eigenspannungsmessungen (Zerlegemethode) liegen mit -67 und -73 N/mm² bzw. mit -32 N/mm² (Bohrlochmethode) etwa zwischen diesen beiden Ergebnismiveaus. Aus diesen Ergebnissen ist zu schließen, dass auch in der dünnen Rippe der Palette Entfestigungsvorgänge durch Kriechen ablaufen.

In Messposition 5 auf der Unterseite der Palette liegen die mit dem elasto-plastischen Werkstoffmodell berechneten Eigenspannungen bei -70 N/mm² und die mit dem visko-plastischen Modell berechneten bei -56 N/mm² (Bilder 20 bzw. 21). Die Messwerte der minimalen Hauptnormalspannungen (Bohrlochmethode) liegen im Mittel bei -18 N/mm² (Einzelwerte -10, -20 und -23 N/mm²). Auch hier hat die Berechnung mit dem visko-plastischen Modell zu realeren Ergebnissen geführt, wenn auch der Unterschied zwischen simulierten und gemessenen Eigenspannungswerten immer noch relativ hoch ist.

Auf der Oberseite des Gussstückes in Messposition 1 verringern sich bei Berücksichtigung des visko-plastischen Werkstoffverhaltens die berechneten Zugeigenspannungen von ursprünglich +49 auf +46 N/mm² (nicht im Bild). Die gemessenen Werte (Bohrlochverfahren) der maximalen Hauptnormalspannungen liegen im Mittel bei +39 N/mm², (Einzelwerte +21, +41, +49 und +44 N/mm²) d. h. näher an den Berechnungen nach dem visko-plastischen Werkstoffmodell.

**Beurteilung und Diskussion**

Die Ergebnisse der Versuche unter Berücksichtigung der verschiedenen Kernformstoffe bestätigen einen deutlichen Einfluss dieser Parameter auf das Eigenspannungsniveau von Eisengussstücken. Unter Berücksichtigung der individuellen Form-

stoffmischungen ist abzuleiten, dass das Eigenspannungsniveau tendenziell mit abnehmendem Bindergehalt sinkt. Das dürfte auch einer der Gründe sein, weswegen bei der Anwendung von Kernen aus anorganischen Bindern (Wasserglas  $\text{CO}_2$ ) die höchsten Eigenspannungen entstanden sind. Darüber hinaus ist aber auch das bekanntermaßen schlechte Zerfallsverhalten der Wasserglas  $\text{CO}_2$ -Kerne einer der Gründe für die Entstehung der hohen Eigenspannungen. Auffallend ist darüber hinaus, dass Additive, insbesondere anorganische Fe-/Al-/Ti-Oxid-haltige, das Eigenspannungsniveau reduzieren. Diese Additive sind ursprünglich dafür vorgesehen, Blattrippen bei Gussstücken aus Eisengusswerkstoffen zu vermeiden. Sie wirken dadurch, dass sie die Gleiteigenschaften des Sandgemisches bei Korn-an-Korn-Reibung verbessern oder/und plastifizierende Wirkung haben. Es ist offensichtlich die Wirkung dieser Zusätze, die dazu beiträgt, dass die Zugeigenspannungen im Mittelsteg des Spannungsgitters geringer ausfallen als bei allen anderen untersuchten Formstoffvarianten. Dem Schrumpfungsprozess des Spannungsgitters werden weniger starke Kräfte entgegengesetzt.

Zwischen den Messwerten der Eigenspannungen, die mit der Zerlegemethode ermittelt wurden, sind deutliche Unterschiede festzustellen. So betragen z. B. Eigenspannungswerte in den Mittelstegen der drei Spannungsgitter mit dem Kernformstoff Cold-Box-PUR 44,71 bzw. 46  $\text{N/mm}^2$ . Die Eigenspannungswerte in den Mittelstegen der Spannungsgitter Cold-Box-Sand, eckiges Korn, liegen bei 50, 68 und 74  $\text{N/mm}^2$ . Die Unterschiede zwischen den Spannungsgittern der anderen Kernformstoffe liegen teilweise niedriger. Diese Ungenauigkeiten dürften sich zu einem wesentlichen Teil aus dem Messprinzip und der Auswertemethodik ergeben. Aus der Gesamtheit aller durchgeführten Eigenspannungsmessungen nach dem Zerlegungsverfahren lässt sich eine Messgenauigkeit von  $\pm 25 \text{ N/mm}^2$  schlussfolgern. Dies entspricht etwa der im Rahmen von [21] ermittelten Messgenauigkeit des Bohrlochverfahrens (bei Prüfung von Stahl) mit im Mittel  $\pm 25 \text{ MPa}$ . Bei der Eigenspannungsmessung von Gussstücken aus GJS und GJL mit dem Bohrlochverfahren ist mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 30 \text{ MPa}$  zu rechnen. Diese Verhältnisse sind auch grundsätzlich bei den Vergleichen von Eigenspannungsmessergebnissen der genannten Messverfahren mit den Ergebnissen der rechnerischen Simulation zu beachten. Robuste und etablierte Verfahren zur Messung von makroskopischen Eigenspannungen I. Art in Gusseisen mit einer deutlich höheren Genauigkeit stehen jedoch derzeit nicht zur Verfügung.

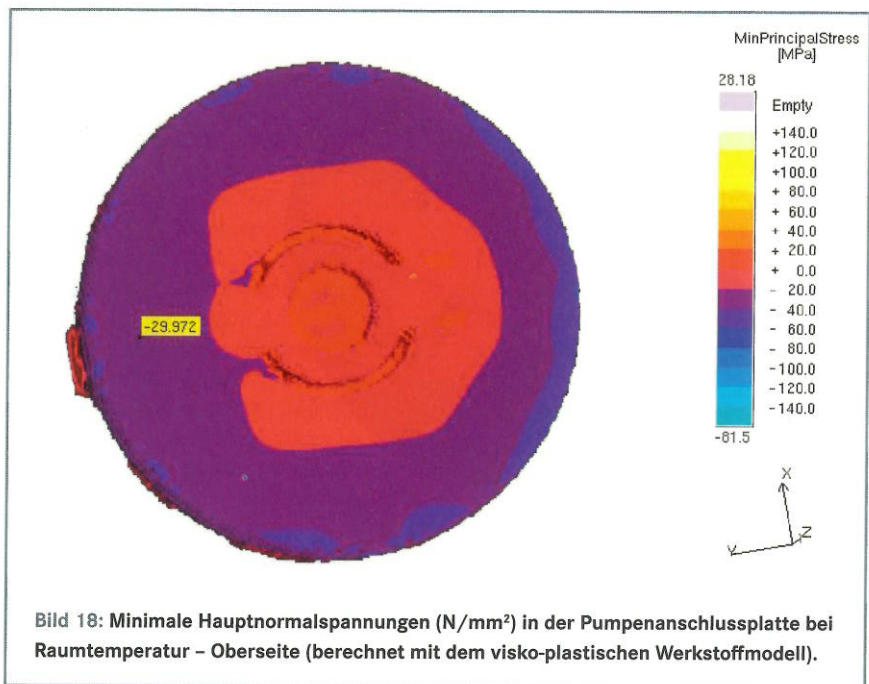


Bild 18: Minimale Hauptnormalspannungen ( $\text{N/mm}^2$ ) in der Pumpenanschlussplatte bei Raumtemperatur - Oberseite (berechnet mit dem visko-plastischen Werkstoffmodell).

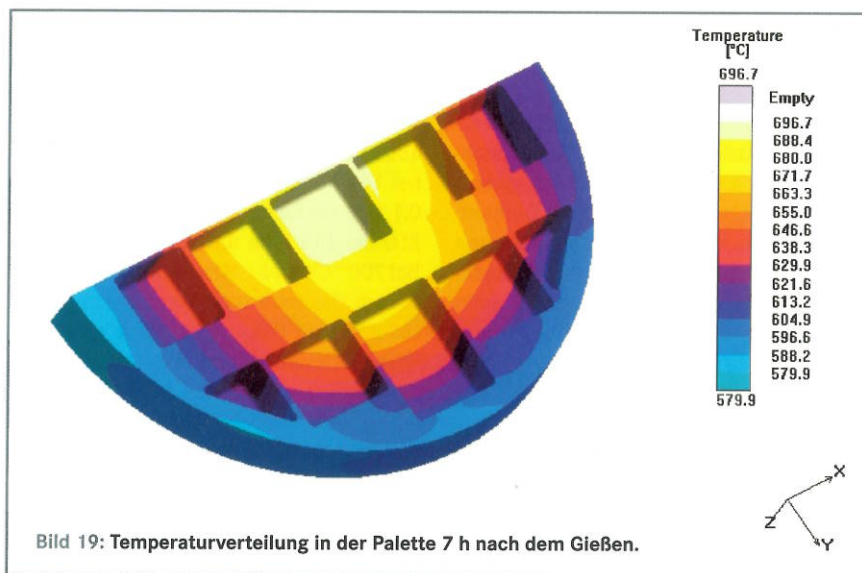


Bild 19: Temperaturverteilung in der Palette 7 h nach dem Gießen.

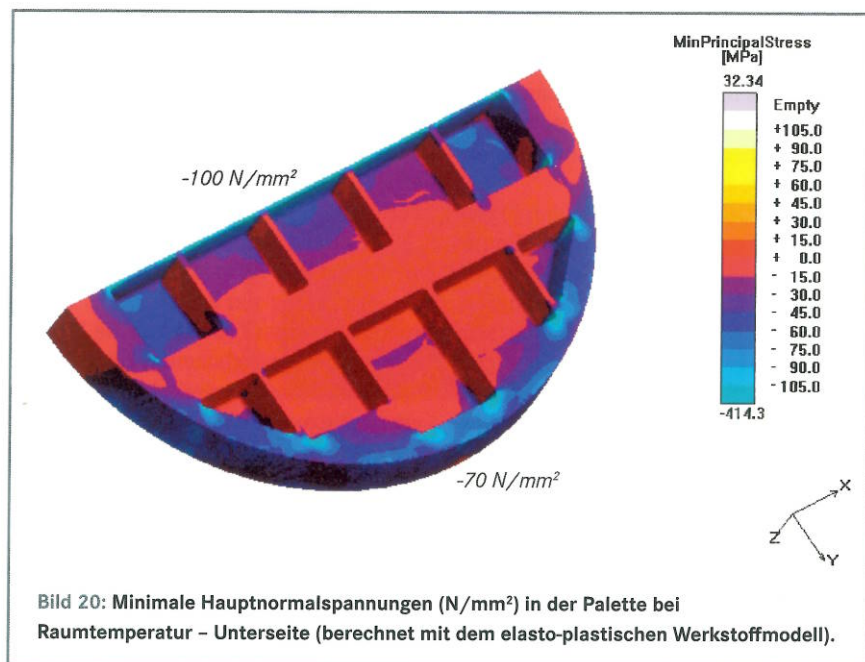
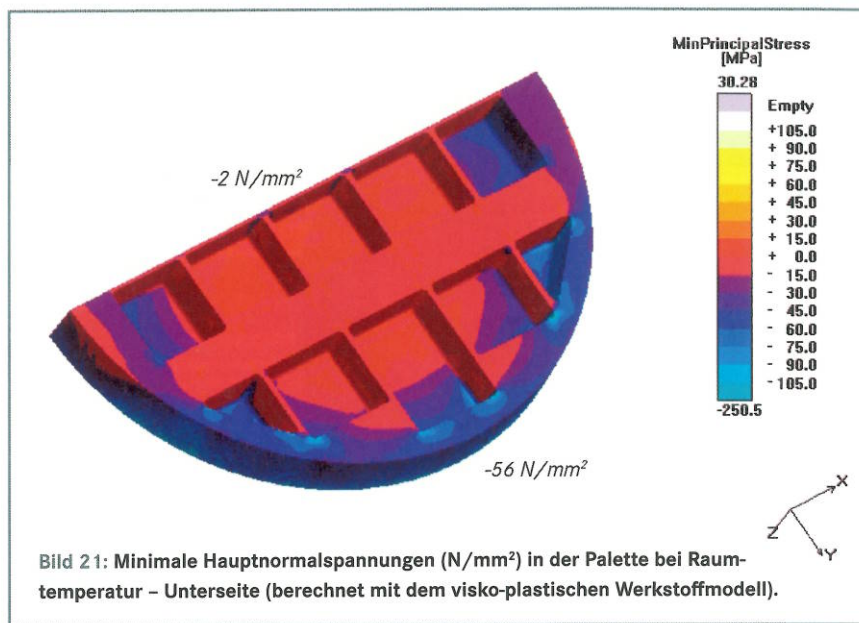


Bild 20: Minimale Hauptnormalspannungen ( $\text{N/mm}^2$ ) in der Palette bei Raumtemperatur - Unterseite (berechnet mit dem elasto-plastischen Werkstoffmodell).



Im Rahmen der Versuche konnte mit Hilfe von elektromagnetischen Eigenspannungsmessungen ein zeitabhängiger Eigenspannungsabbau bei GJL innerhalb von 126 Tagen nicht nachgewiesen werden. Diese Aussage gilt unter Berücksichtigung einer angenommenen Messgenauigkeit von ca.  $\pm 20$  bis  $25 \text{ N/mm}^2$ . Dementsprechend kann die Langzeitauslagerung von GJL-Gussteücken als wenig wirksam zur Minimierung von Eigenspannungen bzw. zur Reduzierung der Verzugs- und Rissgefahr eingestuft werden. Diese Aussage schließt allerdings mikrostrukturelle Veränderungen im Werkstoff, die bereits im Rahmen von [12] festgestellt wurden, nicht ein. Messungen der Resonanzfrequenz von abgegangenen Spannungsgittern haben ergeben, dass innerhalb einer Zeit von ca. 50 Tagen die Resonanzfrequenz um etwa 1 % ansteigt und sich einem Plateau annähert. Insofern ist grundsätzlich davon auszugehen, dass im Werkstoff nach dem Gießen Eigenschaftsveränderungen ablaufen, jedoch keine ausgesprochen makroskopischen Eigenspannungsreduzierungen.

GJS und GJL zeigen gemäß den Ergebnissen in [4] ausgehend von einer Raumtemperatur bis ca.  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  einen leichten Abfall von Zugfestigkeit und Dehngrenze. Oberhalb von  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  beschleunigt sich die Tendenz. Entsprechend dieser Ergebnisse zeigen beide Werkstoffe bereits bei dieser Temperatur bei konstanter Belastung eine Entfestigung (Kriechen). In diesem Zusammenhang soll erwähnt sein, dass GJL bei entsprechend hohen Belastungen ( $> 50 \%$  der Dehngrenze) auch bei Raumtemperatur bereits schwache Kriecherscheinungen zeigt. Im Temperaturbereich ab  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  zeigen GJS und GJL innerhalb von wenigen Stunden bzw. Minuten

deutliches Kriechen, d. h. einen Spannungsabbau.

Wie bereits dargestellt, kriecht bei gleicher Belastung der Werkstoff GJL gegenüber GJS mit stärkeren Beträgen. Bei  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  hat sich die Probe aus GJS-400-15 bei  $149 \text{ MPa}$  Belastung nach 300 min um  $0,1 \text{ mm}$  verformt und die Probe aus GJL-250 bei  $148 \text{ MPa}$  um bereits ca.  $0,3 \text{ mm}$ . Bei  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $31 \text{ MPa}$  Belastung verformte sich GJS innerhalb von 50 min um ca.  $0,5 \text{ mm}$  und GJL um deutlich  $> 1,5 \text{ mm}$ . Diese Relationen sind insofern nicht verwunderlich, als dass die  $149 \text{ MPa}$   $70 \%$  bei GJS-400-15 und  $100 \%$  der Dehngrenze bei GJL-250 darstellen. Auch diese stärkere Entfestigung dürfte ein Grund dafür sein, dass Gussteile aus GJL geringere Eigenspannungen aufbauen als solche aus GJS, wie bereits in [4] dargestellt wurde.

Vergleicht man allerdings das Kriechverhalten bei Belastungen und bei gleichen Anteilen der Dehngrenze, liegen die Verhältnisse vor allem bei niedrigeren Temperaturen anders. Bei Belastung von GJL-250 und bei  $100 \%$  der Dehngrenze bei  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $148 \text{ MPa}$ ) ist nach 300 min eine Verformung von  $0,3 \text{ mm}$  festzustellen. Bei GJS-400-15 und  $100 \%$  der Dehngrenze (entsprechend  $213 \text{ MPa}$ ) ist nach 300 min eine Verformung von bereits ca.  $0,6 \text{ mm}$  zu verzeichnen. Bei  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  sind die Verhältnisse dann ausgeglichener. Diese Relationen geben einen Hinweis darauf, dass GJL eine geringere (auf die Dehngrenze bezogene) „spezifische“ Entfestigung aufweist als GJS.

Die Durchführung der Erstarrungs-, Abkühlungs- und Eigenspannungssimulationen unter Berücksichtigung des elastoplastischen und visko-plastischen Werkstoffmodells und der entsprechenden Kriechdaten hat gezeigt, dass das visko-

plastische Werkstoffverhalten, d. h. die Entfestigung durch Kriechvorgänge, einen deutlichen Einfluss auf die Eigenspannungsbildung in Gussteilen aus grauen Gusseisen ausübt. Die Simulationsergebnisse konnten mit Hilfe des visko-plastischen Werkstoffmodells zum Teil deutlich den gemessenen Eigenspannungswerten angenähert und damit verbessert werden.

Die ermittelten Kriechdaten gelten selbstverständlich nur für die entsprechenden Legierungszusammensetzungen und Graphitformen. Bei Gusseisenlegierungen mit deutlichen Abweichungen in den Elementgehalten (z. B. bei Si, Mn und Ni) muss mit einer Beeinflussung der Kriechmechanismen und -geschwindigkeiten durch diese Legierungselemente gerechnet werden. Ebenso bei Gusseisen mit Vermiculargraphit.

*Das IGF-Vorhaben 15333 N der Forschungsvereinigung Gießereitechnik e. V. FVG, Sohnstraße 70, 40237 Düsseldorf, wurde über die AiF (Forschungsvorhaben Nr. 15333 N/1, Düsseldorf 2010) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert und vom Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (BDG) fachlich betreut. Hierfür sei an dieser Stelle gedankt. Ebenfalls gedankt sei den Teilnehmern des begleitenden Arbeitskreises sowie der Magma GmbH, Aachen, für die Unterstützung bei der Durchführung verschiedener Teilaufgaben.*

*Dipl.-Ing. Ulrich Quack, Dr.-Ing. Wolfram Stets und Dr.-Ing. Gotthard Wolf, Institut für Gießereitechnik gGmbH, Düsseldorf*

#### Literatur:

- [1] Egener-Walter, A.: *Simulation des Entstehens von Eigenspannungen in Gussteilen. Dissertation Universität Siegen. Shakerverlag, Aachen, 1998.*
- [2] Pistol, G.; Mai, R.; Rudel, H.: *Gießereiforschung 42 (1990) Nr. 4, S. 179-182.*
- [3] Kasch, F.E.; Mikelonis, P.J.: *Trans. Amer. Foundrym. Soc. 77 (1969), S. 77-89.*
- [4] IfG-Forschungsbericht E-289: *Minimierung von Eigenspannungen und Verzug von Gussteilen aus Gusseisen. AiF-Forschungsvorhaben Nr. 12688, Düsseldorf 2003.*
- [5] IfG-Forschungsbericht E-85: *Untersuchungen über die metallurgischen und metallkundlichen Voraussetzungen für die Warmrissbildung in Stahlguss. AiF-Forschungsvorhaben Nr. 1230 und 1682, Düsseldorf 1973.*

[6] Kocjubinski, O. J.: *Litejnoe Proizvodstvo in Deutsch (1961) Nr. 6, S. 40-43.*

[7] *Vermeidung und Beseitigung von Eigenspannungen in Gussstücken aus GJL, VDG-Merkblatt N 1, 1981.*

[8] Richter, R.: *Form- und gießgerechtes Konstruieren. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1984.*

[9] Mayer, H.: *1. Forum für Gußanwendungen. Gusseisen im Maschinenbau, Oberwinterthur 1990, S. 31-41.*

[10] Rickards, P. J.; Aplin, P. F.; Al Zamily, A. A. H.: *Good vibrations - alternative stress relief for castings. Metallurgia (1998) Nr. 4, S. 127-130.*

[11] Kuehl, K.M.: *Aging of gray iron: tensile strength and resonant frequency studies at Waupaca foundry. AFS Transactions 111 (2003), S. 725-731.*

[12] Nicola, W. M.; Richards, V.: *Age strengthening of gray iron, phase I: Statistical verification. AFS Transactions 107 (1999) 191, S. 749-755.*

[13] Varga, L.; Dul, J.: *Möglichkeiten der Herabsetzung der Eigenspannung von Gusseisen mit Lamellengraphit. Banyaszati es Kohaszati Lapok - Kohaszat 135 (2002) Nr. 6/7, S. 195-199.*

[14] Münkner, J.: *Untersuchung und Weiterentwicklung der Auswertemethoden für Eigenspannungsmessungen. Dissertation Universität Siegen, 1995.*

[15] Feikus, F. J.; Stika, P.; Huber, J.: *Auswirkung der Abschreckbehandlung auf die mechanischen Eigenschaften und Eigenspannungen von Al-Motorgussteilen. Gießerei 91 (2004) Nr. 8, S. 57-64.*

[16] Taran, V.: *Entwicklung einer Technologie zur Fertigung eines Aluminium-Zylinderkopfes aus Gradientenguss. Dissertation Universität Magdeburg, 2001.*

[17] Flach, J.; Rosenau, M.; Sapahpour, M.: *Instandsetzung von Gussfehlern an einem 50-t-GG-25-Zylinderblock durch artfremdes Fertigungsschweißen mit Ermittlung von Schweißspannungen. VDI-Bericht 1998.*

[18] Kuroda, Y.; Iga, A.; Seo, K.: *Experimental study on residual stress in diesel engine cylinder head. J. of Jap. Foundry Soc. 74 (2002) Nr. 3, S. 182-187.*

[19] Bähr, R. u. a.: *Eigenspannungsuntersuchungen an Zylinderköpfen. Gießerei 87 (2000) Nr. 1, S. 54-57.*

[20] Fent, A.: *Einfluss der Wärmebehandlung auf den Eigenspannungszustand von*

*Aluminiumussteilen. Dissertation Technische Universität München, 2001.*

[21] Schröder, J.; Keuter, J.M.; Priesmeyer, H.G.: *Residual Stress Investigations on a Hot-Rolled Plane Sandwich-Type Composite X5 Cr Ni 18 9-C45-X5 Cr Ni 18 9 by Means of Neutron Diffraction. Journal of strain analysis, 30 (1995) Nr. 1, S. 15-20.*

[22] *IfG-Forschungsbericht E-352: Messung und Simulation von Eigenspannungen in Gussstücken aus Gusseisen unter besonderer Berücksichtigung von Kernformstoffen, AiF-Forschungsvorhaben Nr. 15333 N/1, Düsseldorf 2010.*

### Abluftreinigungsanlagen für die

- Cold-Box-Kernmacherei
- Hot-Box und Croning-Kernmacherei
- Gieß- und Kühlstrecke



### Komplettservice, bestehend aus

- Anlagenplanung, Lieferung und Montage
- Ersatzteilservice (auch für ARASIN-Anlagen)
- Wartung nach WHG
- Übernahme der Ver- und Entsorgung in Zusammenarbeit mit der Buchen UmweltService GmbH, Voerde
- Über 350 ausgeführte Anlagen zwischen 450 – 76.000 m³ Abluft/h

### B.G.T. GmbH

Umwelttechnische Anlagen • In der Beckuhl 54 • D-46569 Hünxe  
Tel. 0 28 58/91 500 • Fax 0 28 58/91 50 50  
E-Mail [info@BGT-Umwelttechnik.de](mailto:info@BGT-Umwelttechnik.de)  
Internet [www.BGT-Umwelttechnik.de](http://www.BGT-Umwelttechnik.de)

Wir stellen aus: GIFA 2011, Düsseldorf

## WESTA Fördertechnik



**Stahl-Scharnierbandförderer**  
- Auch in Edelstahl  
- Plattenstärke 2,5 oder 5 oder 8 mm



**Rollenbahnanlagen:**  
- Rollenbahnen  
- Übersetzer, Drehtische  
- Etagenlifte, Kurven...



**Werkstückträger-Transportsysteme**  
- Zuführstrecke zum Roboter  
- Für hohe Belastungen



**Gurtt Förderer**  
- für Stück- u. Schüttgüter  
- Muldengurtt Förderer

Gutenbergstraße 2  
D-67307 Göllheim

Tel.: +49 6351 / 1321-0  
Fax.: +49 6351 / 1321-22  
e-mail: [kontakt@westa-web.de](mailto:kontakt@westa-web.de)