

# Gusskonstruktion und Gussanwendung (3. Folge)



FOTO: BDG/SOSCHINSKI

Die Fertigungstechnik Gießen verfügt über einen großen Gestaltungsfreiraum.

### Bauteilentwicklung

A. Kleine [1] stellt das Teilprojekt des Projektvorhabens „Powertrain“ im Rahmen des Wachstumskerns AL-CAST vor, das sich mit der Integration von Al-Strukturelementen in Al-Zylinderkurbelgehäusen durch Verbundguss befasst. Die untersuchten AlSi30CuNiMg-Liner ergeben in Kombination mit den bereits existierenden Kolbenringen ein neuartiges Tribosystem, das sich durch eine extrem hohe Verschleißbeständigkeit auszeichnet. Für die Herstellung von aluminiumbasierten Lagerstuhlverstärkungen kam zur Realisierung der Bauteilanforderungen das indirekte Squeeze-Casting-Verfahren zur Anwendung. Mit dem in einem Arbeitsgang aus den zwei Werkstoffen erzeugten Kombi-Insert konnte eine komplexe Strukturverstärkung erzielt werden.

M. Menge und T. Zeuner [2] diskutieren in ihren Ausführungen die verschiedenen Gießverfahren zur Herstellung von Leichtmetallfahrwerksteilen, wie Druckgießen, Schwerkraft-Kokillengießen und Gegen-druck-Kokillengießen, die Simulation und Bauteilkonzeption, das Produkt- und Prozessengineering sowie notwendige Qualitätsprüfungen und geben Hinweise zur Auswahl des geeigneten Gießverfahrens. Letztere sind abhängig von der Anwendung des Gussteils und den Anforderungen insbesondere an Geometrie und Festigkeit (Bild 1). Der Einsatz von Aluminiumgussteilen im Fahrwerk nimmt heute eine herausragende Rolle ein. Vorteilhaft sind das

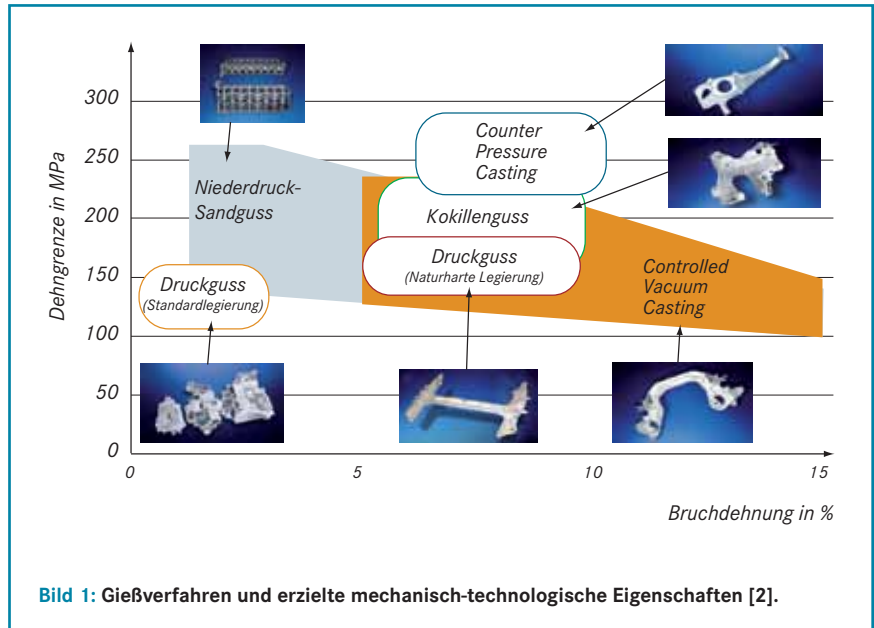


Bild 1: Gießverfahren und erzielte mechanisch-technologische Eigenschaften [2].

positive Crashverhalten, die geringere Korrosion, die gegenüber anderen Gusswerkstoffen bessere Maßhaltigkeit gegenüber Schweißkonstruktionen und die weitgehende Funktionsintegration. Hinzu kommt die gestalterische Freiheit, die das Gießverfahren dem Konstrukteur ermöglicht.

S. Beer [3] teilt mit, dass nach Einschätzung der KS Aluminium Technologie GmbH, Neckarsulm, die klassischen Verbrennungsmotoren Otto und Diesel in den nächsten 15 bis 20 Jahren noch die dominierenden Konzepte sein werden, auch wenn alternative Antriebe in verschiedenen Varianten entwickelt werden. Dabei kommt der Elektrifizierung in unterschiedlichem Ausmaß eine wesentliche Bedeutung zu. Bei einer zunehmenden Anzahl alternativer Kraftstoffe ist von einer steigenden Vielfalt an Antriebsvarianten auszugehen. Bei überwiegend urbanem Einsatz werden bereits in wenigen Jahren Elektroantriebe an Bedeutung gewinnen. Die verschiedenen hybriden Antriebe (z. B. Parallel, Mild, Power Split) kommen für ge-

mischte Einsatzgebiete in Frage, während bei überwiegendem Langstreckenbetrieb, der Verbrennungsmotor zumindest als sogenannter Range-Extender, zur Erhöhung der Reichweite noch lange Zeit ohne wirtschaftliche Alternative sein wird. Unter diesen Rahmenbedingungen werden Aussagen zu den geeigneten Gießverfahren für Zylinderkurbelgehäuse aus Aluminium gegeben (Tabelle 1).

R. Bähr u. a. [4] befassen sich mit den Gefügevoraussetzungen für das Laserlieren der Zylinderlaufflächen von Zylinderkurbelgehäusen aus Aluminium. Eine der wesentlichsten Gewichtseinsparungen im Fahrzeug ist durch die Einführung von Zylinderkurbelgehäusen aus Aluminium-Silicium-Legierungen erreichbar. Die Hauptaufgabe eines Zylinderkurbelgehäuses ist die Lagerung der Kurbelwelle in den Lagerstühlen und die Führung der Kolben in den Zylindern. Die Laufflächen der Zylinder werden im Motorbetrieb besonders beansprucht und müssen deshalb an der Oberfläche ein

Tabelle 1: Bewertungskriterien von Gießverfahren für Aluminium-Zylinderkurbelgehäuse [3].

Bewertungskriterien	Niederdruckgießen	Schwerkraftgießen	Druckgießen	Kernpaket (CPN)	Lost-Foam
Dynamische Lagerstuhlfestigkeit	++	++ (V-Block kritisch)	+	++ (Kühleisen)	-
Laufflächenbeschichtung	++	++	+	+(Kühleisen)	-
Design-Variabilität	+	+(SPM)	0 (Closed-Deck)	++	++
Übereutektische Legierung	++	0	-	-	-
Mögliche Motorenleistung	++	++	+	++	-
Produktions-Volumina	-	+	++	++	++
Herstellkosten	- ... +	0 ... +	+ ... +	- ... +	+

-- extremer Nachteil - Nachteil 0 neutral + Vorteil ++ großer Vorteil

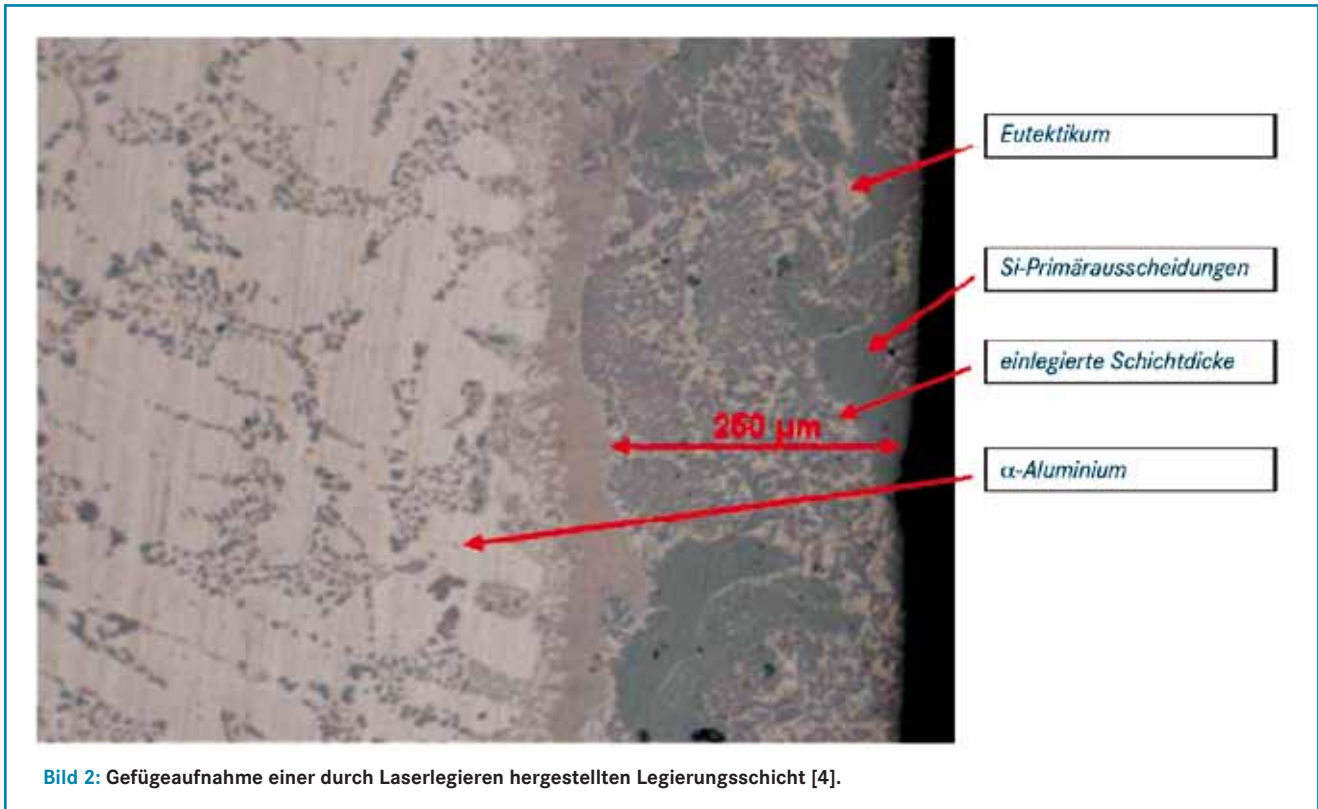


Bild 2: Gefügeaufnahme einer durch Laserlegieren hergestellten Legierungsschicht [4].

extrem verschleißfestes Gefüge aufweisen. Zur Erzeugung eines verschleißfesten Gefüges gibt es viele verschiedene Möglichkeiten mit den entsprechenden Vor- und Nachteilen. Durch lokales Werkstoffengineering, wie das Laserlegieren der Zylinderlaufflächen, ist eine besonders gute Verschleißschicht (Bild 2), verbunden mit geringen Kosten, zu erzielen. Am Beispiel des 3-Zylinder-Kurbelgehäuses von VW wird die Gießtechnik auf Tauglichkeit geprüft, es werden die erforderlichen Eigenschaften des Gussgefüges für das Laserlegieren untersucht und die Machbarkeit wird nachgewiesen.

R. Weber und W. Görtz [5] betrachten den Werkstoffeinsatz bei Zylinderkurbelgehäusen hinsichtlich der Forderungen nach zukünftig sinkenden CO<sub>2</sub>-Grenzwerten. Das erfordert konstruktive Lösungen, um den Kraftstoffverbrauch weiter zu reduzieren. Dies kann über Verbrennungskonzepte, Downsizing, Hybridisierung und Gewichtsreduzierung realisiert werden. Die Autoren sehen besondere Einsatzchancen für Zylinderkurbelgehäuse aus Gusseisen. Denn neben der Möglichkeit, Leichtbaukonzepte in Gusseisen zu realisieren sowie höchsten Bauteilbelastungen bei zukünftigen Downsizingkonzepten standzuhalten, spricht auch der günstige Preis für den Werkstoff Gusseisen. Das Spannungsfeld, in dem die Entscheidung der Konstrukteure für einen Werkstoff getroffen wird, und die Möglichkeiten, die der Werkstoff Gusseisen bietet, werden in diesem Beitrag diskutiert.

### Gusskonstruktion

D. Joshi und B. Ravi [6] klassifizierten und simulierten dreidimensionale Verbindungsstellen in Gussteilen. Dafür wurde das Gussteil als eine beliebige Anzahl einzelner Elemente oder Wandstücke betrachtet. Die Verbindungsstellen wurden so nach Länge, Dicke, Höhe und Ausrundungsradius, Winkelverhältnissen und anderen geometrischen Merkmalen, wie dem Höhen-Dicken-Verhältnis, der Querschnittsgestalt, Form und Größe des Hohlraums sowie der Dimensionalität der Verbindungen klassifiziert. Zur Simulation des Erstarrungsverlaufs und zur Ermittlung der Schwindungsporosität wurde eine Vektorelement-Methode verwendet, deren mathematische Grundlage erläutert wird. Die radiographische Untersuchung eines Versuchsgussteils aus unlegiertem Stahl bestätigte die Tauglichkeit dieser Vektorelement-Methode zur Identifizierung der Schwindungsporositätsart. Außerdem wurde bestätigt, dass vielfach bereits geringfügige Veränderungen an der Geometrie der Verbindungsstelle zur Minimierung des Porositätsausmaßes führen können. Anhand des Verhältnisses der jeweils berechneten Hot-Spot-Fläche zum Gesamtvolumen der Verbindungsstelle wurde die Effektivität einer Parameteränderung ermittelt und das Ergebnis zu Regeln für die fertigungsgerechte Konstruktion einer dreidimensionalen Verbindungsstelle zusammengefasst. Mit Hilfe von Entformungsschraffen wird gewährleistet, dass sich ein

gegossenes Bauteil einfach aus der Form lösen lässt. K. Neumann [7] weist darauf hin, dass seit einiger Zeit die CAD-Visualisierungslösung SpinFire Professional von der Infotech Enterprices GmbH, Leonberg, ein Zusatzmodul für die Entformungswinkelanalyse anbietet. Anwender können damit direkt in SpinFire die Formschrägenwinkel eines oder mehrerer Bauteile einer Baugruppe kontrollieren. Die Formschrägen werden, abhängig vom Winkel der Flächen in Bezug auf eine vorgebbare Entformungsrichtung, durch farbliche Abstufungen angezeigt, und es kann leicht überprüft werden, ob sich das Teil fertigen lässt. Werkzeugkonzepte und Fertigungstechnologien lassen sich dadurch bereits im Entwicklungsstadium überprüfen und der Bau von Prototypen sowie aufwendige Prüfverfahren können vermieden werden.

B. Buchmayr und L. Wunsch [8] weisen darauf hin, dass es durch eine lokal begrenzte Veränderung der Abmessungen und/oder der Festigkeitseigenschaften der Bauteile genauer den konkreten Beanspruchungen anzupassen und dadurch eine rationellere Nutzung des jeweiligen Werkstoffes und höhere Gewichtsreduzierungen zu realisieren. Sie beschreiben die gegenwärtig am häufigsten angewandten konstruktiven und technologischen Lösungen für die lokal begrenzte Bauteilverstärkung und -verfestigung. Das sind zum einen lokal begrenzte, geometrisch angepasste Verstärkungen (Tailored Blanks, Tailored Tubes, Patchwork-Konstruktionen, Weltrohre, be-





**Bild 3:** Druckgussteil „Träger Nebenaggregate“ mit einem sehr hohen Integrationsgrad [10].

lastungsangepasste Trägerprofile), aber auch die werkstoffbedingte Verfestigung (lokal begrenzte Kaltverfestigung, das Einbringen von Druckeigenstress durch Laserstrahlerwärmung und rasche Abkühlung, eine lokal begrenzte dehnungsinduzierte Martensitbildung) und der Einsatz von Verbundwerkstoffen, in denen die benötigten Eigenschaften mehrerer Werkstoffe gezielt kombiniert werden.

Duktile Aluminium-Druckgusslegierungen werden zunehmend im Automobilbau für crashrelevante Baugruppen eingesetzt, gelten aber wegen des hohen Gasgehalts als nur bedingt schweißgeeignet. C. Börner u. a. [9] untersuchten deshalb in einem Forschungsvorhaben am Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig, wie diese Legierungen artgleich und mit Aluminium-Knetlegierungen prozesssicher und wirtschaftlich durch Elektronenstrahlschweißen verbunden werden können, wovon ausführlich im Aufsatz berichtet wird. Danach ist grundsätzlich das Elektronenstrahlschweißen mit hohen Geschwindigkeiten bei zugleich hohen Leistungen gut zum Fügen von duktilem Aluminium-Druckguss geeignet.

E. Ambos u. a. [10] sehen das Druckgießen von Integralkonstruktionen als einen Schlüsselweg zu weiterem Leichtbau und mehr Effektivität an, da zukünftig immer mehr aus der Vielzahl der Anforderungen an das Bauteil ein Optimum von Qualität, Kosten, Ressourcenschonung und Umweltschutz erzielt werden muss. Für die Anwendung solcher Integralkonstruktionen

(Bild 3) werden entwickelte Druckgießtechnologien vorgestellt und auf die sich dabei ergebenden Aufgabenstellungen, Widersprüche und Lösungswege am Beispiel hoch beanspruchter Integraldruckgussteile eingegangen.

U. Reisinger u. a. [11] stellen die für das Schweißen von Aluminiumteilen derzeit einsetzbaren Fügeverfahren vor. Die etablierten Schweiß- und Fügeverfahren zum Verbinden von Aluminiumwerkstoffen sind neben dem Schutzgasschweißen das Laserstrahl- und das Elektronenstrahlschweißen, die Klebtechnik und das mechanische Fügen (Clinchen, Stanznieten). Das Schweißen der Aluminiumwerkstoffe weist einige Besonderheiten auf, die aus den speziellen physikalischen Eigenschaften des Aluminiums resultieren. Da sich die Probleme, welche beim Schweißen von Aluminium auftreten, bei den verschiedenen Schweißprozessen sehr ähneln, werden die schweißtechnischen Herausforderungen anhand des WIG- und MSG-Verfahren erläutert. Auch bei den kalten Fügeverfahren bestehen beim Verbinden von Aluminium besondere Herausforderungen. Da diese beim mechanischen Fügen identisch mit den Problemen bei Stählen sind, d. h. zum Beispiel schlechte Spannungsverläufe und Kerbwirkung durch Niete oder Schrauben, wird speziell auf die Herausforderungen in der Klebtechnik eingegangen. Das mechanische Fügen zeichnet sich durch eine minimale thermische Belastung der Bauteile aus, hat allerdings den Nachteil, dass es unter Umstän-

den zu schlechten Spannungsverläufen im Bauteil kommen kann.

C. Börner u. a. [12] befassen sich in einem von der EU öffentlich geförderten Projekt mit der Schweißbeugung von duktilen Aluminium-Druckgusslegierungen. Bei diesen Legierungen gestaltet sich die schweißtechnische Verarbeitung um einiges schwieriger als bei den Standardlegierungen, da wegen des stärkeren Formklebens mehr Formtrennmittel erforderlich ist (was mit der umgebenden Schmelze reagiert), wodurch große Mengen an Wasserstoff in das Bauteil gelangen. Zusätzlich neigen die Legierungen zu einer höheren Wasserstoffaufnahme. Bei der Wiedererwärmung diffundiert dieser in Richtung der Schweißnaht und kann dort zu einer erhöhten Porenbildung führen. Es werden verschiedene schweißtechnische Möglichkeiten zum Fügen von diesen duktilen Aluminium-Druckgusslegierungen mit Hilfe des Elektronenstrahls aufgezeigt. Durch eine geeignete Anpassung der Prozessparameter sind porenarme Schweißnähte mit guten Festigkeitseigenschaften herstellbar. Darüber hinaus erfolgten vergleichende Untersuchungen mit dem Laserstrahl- und Lichtbogenschweißverfahren. Dabei stellte sich heraus, dass mit diesen Verfahren erwartungsgemäß nicht die hohe Qualität der elektronenstrahlgeschweißten Nähte erreicht wird.

P. Marks [13] gibt einen aktuellen Überblick über die Bezeichnung der Gusseisensorten nach DIN-Normen und nach Europäischen Normen in deutscher und engli-

scher Sprache. Neben alphanumerischen Auflistungen der einzelnen Sorten nach alten und neuen Werkstoffbezeichnungen sowie nach neuen und alten Werkstoffnummern werden in Übersichtstabellen die Anwendungsbereiche für die unterschiedlichen Gusseisensorten angeführt. Darüber hinaus werden die Stahlgussbezeichnungen nach EN und DIN verglichen und die Anwendungsbereiche mit Angabe der Werkstoffnummern aufgelistet. Den Abschluss bildet ein Verzeichnis der zitierten Werkstoffnormen für Gusseisen und Stahlguss. Zwei Übersichtskarten geben einen Einblick in den Gesamtaufbau der Bezeichnung von Gusseisenwerkstoffen durch Kurzzeichen und Nummern.

S. Heyde und J. Lindner [14] befassen sich in ihren Ausführungen mit dem Trag sicherheitsnachweis und der diesbezüglichen Ertüchtigung von historischen Stützen aus Gusseisen mit Lamellengraphit (EN-GJL), die in denkmalgeschützten Gebäuden aus der Zeit um 1900 erhalten werden müssen. Ihre Tragfähigkeit haben diese Bauteile für die bestehenden Lasten zwar unter Beweis gestellt, eine Umnutzung ist jedoch im Allgemeinen mit vergrößerten Lasten verbunden, und der Nachweis der Tragfähigkeit muss entsprechend den geltenden Sicherheitsanforderungen erneut erbracht werden. In den aktuellen Normen DIN 18800-2 und DIN EN 1993-1 sind historische Baustoffe aber nicht mehr enthalten, sodass derzeit kein gültiges Nachweisverfahren für diese Bauteile existiert. Es wird daher im Beitrag ein Verfahren vorgestellt, mit dem im Sinne eines Ersatzstabverfahrens entsprechend den aktuellen Normen der Stabilitätsnachweis für historische Stützen unter zentrischer und exzentrischer Belastung geführt werden kann. Darüber hinaus wird die Frage diskutiert, inwieweit historische Stützen durch Verfüllen mit selbstverdichtendem Beton ertüchtigt werden können. Hierzu wurden experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bestimmung der Traglast von beidseitig exzentrisch gelagerten Hohlstützen sowie von ausbetonierten Stützen durchgeführt und ein FEM-Modell kallibriert. Für einseitig eingespannt gelagerte Stützen wird ein variabler Knicklängenbeiwert  $\beta$  vorgeschlagen, der in seiner Größe von der bezogenen inneren Exzentrizität abhängig ist. Zur statistischen Bewertung der Ergebnisse im Sinne des aktuellen semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts wurde aus dem Bemessungskonzept und den zur Verfügung stehenden Daten von historischen Gussstützen ein widerstandsseitiger Teilsicherheitsbeiwert nach dem Verfahren aus DIN EN 1990, Annex D bestimmt. Für mit selbstverdichtendem Beton ausbetonierte Gussstützen konnte herausgearbeitet werden, dass die Steigerung der Traglast für Guss-

materialien mit kleinerer Festigkeit und für Geometrien mit großer innerer Exzentrizität am größten ausfällt.

M. Collignon [15] befasste sich in ihrer hier beschriebenen Dissertation mit dem Schädigungsmechanismen von Brems scheiben. Reibungsbremsen sind Sicherheitsbauteile, die hohen Belastungen ausgesetzt sind. Es gibt zahlreiche Patente, die in der Regel die Kühlgeometrie und das Material betreffen. Die geometrische Gestaltung der Kühlvorrichtungen basiert auf Rippen- oder Bolzenformen. Die Schädigung von Brems scheiben beruht auf thermischer Ermüdung, was zu oberflächlichen Rissen auf den Scheiben und dann zu makroskopischer Rissbildung führt. Die Bremsvorgänge selbst stellen ein komplexes wissenschaftliches Problemfeld dar, zu dem mehrere Faktoren, u. a. die Thermik, einen Beitrag leisten. So können die Oberflächen von Brems scheiben Temperaturen von bis zu 800 °C erreichen. Die Lebensdauer von Brems scheiben für Nkw lässt sich nur verbessern, wenn die thermische Wechselfestigkeit und Rissbeständigkeit des gewählten Werkstoffs optimiert wird.

Im Automobilbau erlangt das stoffschlüssige Fügen von Mischverbindungen mit eingeschränkter Schweißbarkeit als innovative Verbindungstechnologie einen immer größeren Stellenwert. Das Laserstrahlschweißen von Getriebekomponenten aus Gusseisen mit Kugelgraphit und Einsatzstahl unter Verwendung von austenitischen Zusatzwerkstoffen auf Basis von Nickellegerungen ist heute in der Serienfertigung ein etabliertes Fügeverfahren. A. Bünting und S. Francke [16] berichten, dass die Daimler AG, Stuttgart, erstmals in der serien nahen Erprobung innerhalb einer innovativen Prozesskette einen prozesssicheren Laserstrahlschweißprozess ohne Zusatzmaterial entwickelt hat. Die Kombination aus Laserstrahlung und aktiver Nahtpositionsregelung mittels Prozessoptik ermöglicht es, das Mischungsverhältnis innerhalb des Schweißgutes durch hoch genaue Strahlpositionierung exakt und reproduzierbar einzustellen, sodass es zu keiner Verringerung der Bruchfestigkeit und -zähigkeit kommt.

### Simulationstechniken

C. Heisser u. a. [17] teilen mit, dass zur besseren Ausnutzung der Rechnerkapazität die Gießverfahrenssimulation mit einem selbstständigen Optimierungsverfahren auf der Basis eines genetischen Algorithmus gekoppelt werden kann, wie es sich in der Designoptimierung bewährt hat. Der genetische Algorithmus entscheidet für jeden Optimierungsgang, ob die jeweilige Parameterkombination eliminiert, verändert, mit bereits berechneten oder bisher noch nicht

berechneten Daten kombiniert oder unverändert beibehalten wird, wodurch sich eine neue Parameterkombination ergibt. Dieser Prozess wird fortgesetzt, bis keine bessere Lösung gefunden werden kann. Am Beispiel eines sicherheitskritischen Fahrzeugbauteils aus Gusseisen mit Kugelgraphit wird eine dreistufige autonome Optimierung des Gießsystems vorgestellt. Die Anwendung der autonomen Optimierung führte bei diesem Beispiel zu einer Reduzierung des Gussgewichtes um 5 kg, ohne die Gussqualität zu beeinträchtigen. Das zweite Beispiel, ein Druckmaschinenhebel mit minimaler Zugfestigkeitsanforderung im kritischen Dickwandbereich des Hebels, führte zu einer Kostensenkung um etwa 35 % durch eine optimierte Gießsystemgestaltung und die Ermittlung eines minimalen, für die Höhe der Zugfestigkeit maßgeblichen Gussstückabstandes in der Form, was zur Platzierung mehrerer Gussteile in einer Form führte. Ein weiteres Einsatzfeld für die autonome Gießverfahrenssimulation ist die inverse Optimierung zur Ermittlung verfahrensgerechter Randbedingungen, zum Beispiel des Wärmeübergangs zwischen Gussstück und Sandformwand sowie zwischen Schmelze und Luft, die dann für genauere Prozesssimulationen herangezogen werden können.

U. Wasmuth [18] befasst sich in seinen Ausführungen mit der experimentellen Ermittlung von Eigenspannungen auf den oberflächennahen Bereichen von Bauteilen zum Abgleich von Simulationen. Diese Untersuchungen beschränken sich in der Regel auf die Nutzung der konventionellen DMS-Methoden oder Röntgenbeugung, weshalb keine orts- oder zeitaufgelösten Informationen über den Eigenspannungsverlauf oder -aufbau zur Überprüfung von Berechnungen herangezogen werden können. Die vorliegende Arbeit befasst sich vor diesem Hintergrund mit der Verbesserung der Berechnungsgenauigkeit von Verbundgussimulationen durch die Nutzung der Neutronenstreuung zur Materialanalyse. Verbundgussbauteile sind aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnung der eingesetzten Werkstoffe während der gesamten Abkühlung sehr hohen Dehnungen ausgesetzt. Als Folge der erheblichen Dehnraten werden Kriechprozesse aktiviert, welche einen Abbau von Spannungen im Gusswerkstoff bewirken. Diese Spannungsrelaxationsvorgänge während des Abkühlprozesses werden bisher in Simulationen nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund können die Simulationsergebnisse signifikant von den Messergebnissen abweichen und es wird meist ein zu hohes Eigenspannungsniveau berechnet.

O. Köser u. a. [19] stellen einen neuen Ansatz zur integrativen Analyse von Temperaturen, Spannungen, Gefügeverteilung

gen und Verzug in Gussteilen vor. In jedem Rechenschritt werden die mechanischen Eigenschaften im Zeitverlauf als Funktion der lokalen Temperatur, Mikrostruktur und Gussfehlerverteilung aktualisiert, wie am Beispiel des Fertigungsablaufes eines fiktiven Aluminiumgussteils demonstriert wird. Die erweiterte Spannungsvorhersage beruht auf einer Erweiterung der Softwarepakete ProCast und Sysweld durch Integration des Zusammenhangs zwischen Mikrogefüge, Gussfehlern und mechanischen Eigenschaften sowie der Implementierung von Ausformung und Entfernung von Gießsystemen und Speisern. Zusammenhänge zwischen mechanischen Eigenschaften und Mikrogefüge können im Rahmen klassischer elastischer, elasto-plastischer, elasto-viskoplastischer mechanischer Modelle definiert werden. An zwei Anwendungsbeispielen wird der neue integrative Simulationsansatz vorgestellt.

R. Bähr u. a. [20] stellen ein theoretisches Konzept zur simulationstechnischen Berechnung von Wöhlerlinien von Aluminiumgusslegierungen aus dem sekundären Dendritenarmabstand des Gussgefüges vor. Auf der Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse, die aus einer numerischen Simulation des Erstarrungsvorgangs gewonnen werden können, wird der Anwender in die Lage versetzt, für jede Stelle eines Gussteils die Festigkeitseigenschaften vorherzusagen zu können. Damit steht sowohl dem Gießer als auch dem Konstrukteur künftig ein zeit- und kostensparendes Verfahren zur Verfügung, mit dem durch angepasste Gießbedingungen die Lebensdauer von Aluminiumgussteilen prognostiziert und gezielt beeinflusst werden kann. Ausführlich wird das verwendete Konzept im BMBF-Abschlussbericht [21] beschrieben.

## Gusswerkstoffe

### Magnesium

S. Lun Sin u. a. [22] untersuchten die Eignung der für Hochtemperaturanwendungen entwickelten Magnesiumgusslegierung AE42 mit 3,65 % Al, 1,39 % Ce, 0,69 % La, 0,43 % Nd, 0,14 % Pr (alles Masse-%) für das Vollformgießverfahren, um die Mög-

lichkeit zur Fertigung endabmessungsnaher, komplex gestalteter Gussteile, die durch Druckgießen oder Kokillengießen nicht wirtschaftlich herstellbar sind, abzuchecken. Die Versuche zeigten, dass die Mg-Al-Ca-Phase zwar Zugfestigkeit und Dehnung bei Raumtemperatur negativ beeinträchtigt, aber bei erhöhten Temperaturen (150 bis 200 °C) zur Vermeidung des Korngrenzgleitens führt und dadurch die Hochtemperaturfestigkeit der Legierung steigert. Die thermischen Eigenschaften der Ca-haltigen Legierung AE42 ermöglichen damit einen Einsatz für Hochtemperaturanwendungen im Fahrzeugbau.

### Aluminium

J. Jorstad [23] berichtet über die Weiterentwicklung der in den 1950er Jahren entwickelten übereutektischen Aluminium-Silizium-Legierung 390, die sich im Motorenbau wegen der hoher Verschleißbeständigkeit, niedriger Wärmeausdehnung und guten mechanischen Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen als Werkstoff für Motorblöcke durchgesetzt und über die Jahre auch dank umfassender Entwicklungsarbeit so weiterentwickelt hat, dass sie im Automobilbau breite Anwendung fand. Auf die Potentiale der entsprechenden Entwicklungen wird im Aufsatz ausführlich eingegangen. Für die Zukunft wird den übereutektischen Al-Si-Gusslegierungen ein verstärkter Wettbewerb mit gegossenen oder stranggepreßten Metallmatrix-Verbundwerkstoffen und Nanoverbundwerkstoffen bei den neuen Leichtbau-Motorkonzepten prognostiziert, ihnen aber für die Übergangszeit bis zu deren Serienreife ein hohes Einsatzpotential bei Diesel-Turbolader-Motoren und CO<sub>2</sub>-armen Hochleistungsmotoren bescheinigt.

U. Böttger [24] berichtet über Untersuchungen am Steinbeis-Zentrum Material Engineering Center Saarland, Saarbrücken, zu Veränderungen der chemischen Eigenschaften und der Struktur von Materialien. Um diese Veränderungen bis hinunter auf die atomare Ebene verfolgen und dreidimensional sichtbar zu machen, wird die Nanotomographie eingesetzt, die ähnlich wie ein Computertomograph räumliche Bilder darstellen kann. Durch die extrem ho-

he Auflösung und durch unterschiedliche Kontrastverfahren kann chemisch analysiert werden, welche Atome enthalten sind. Bei diesen Untersuchungen wurde unter anderem festgestellt, dass das relativ weiche Aluminium durch Zugabe von Silizium härter wird. Das Siliziumgitterwerk im Aluminium kann durch die Zugabe von Strontium beeinflusst und vergleichmäßigt werden. Dabei erzielt die Zugabe von nur wenigen Strontiumatomen schon die gewünschte Wirkung und verändert das dreidimensionale Siliziumnetz wesentlich. Die festeren Aluminiumlegierungen könnten für Aluminiummotorenblöcke der nächsten Generation Anwendung finden.

A. Kleine u. a. [25] vergleichen die bereits im Gusszustand duktile Aluminium-Druckgusslegierung Trimal-37 (Tabelle 2) mit der in Kombination mit einer Wärmebehandlung crashrelevanten Druckgusslegierung Trimal-05, die für Karosseriebauteile moderner Fahrzeuge entwickelt wurde. Bei schlagartiger Beanspruchung zeichnet sich crashrelevantes gegenüber duktilem Werkstoffverhalten in einer etwa 50 % höheren Schlagarbeit und einer nahezu doppelt so hohen Verformung der Proben bis zum Bruch aus. Moderne Aluminiumkarosserien sind aber bewusst so konstruiert, dass nur an exponierten Stellen crashrelevante Druckgussbauteile zum Einsatz kommen müssen. Hier erfüllt die Trimal-05 in Kombination mit einer T7-Wärmebehandlung die geforderten Eigenschaften. Eine Vielzahl der benötigten Druckgussbauteile für die Karosserien muss aber über ein duktileres Werkstoffverhalten verfügen, was die Legierung Trimal-37 bereits im Gusszustand erreicht.

H. Zak und B. Tonn [26] befassten sich forschungsseitig mit der Optimierung der hochfesten AlZnMgCu-Legierungen für das Kokillengießen. Dabei ist es gelungen, die Legierungen des Systems AlZnMgCu für das Kokillengießen zu optimieren. Die entstandene Legierung AlZn7,4Mg2,5Cu2,9 besaß nach der Wärmebehandlung T7 eine sehr hohe Zugfestigkeit von 500 MPa und eine 0,2-Dehngrenze von 460 MPa bei einer Bruchdehnung von 1,5 %. Von Vorteil ist außerdem die deutlich geringere Warm-

Tabelle 2: Richtanalyse der Legierung Trimal 37.

		Chemische Elemente in % (Massenanteil)											
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Mo	Zr	Zn	Ti	V	a. G.	Rest
TR 37	Min.	8,5		0,1	0,3		0,1	0,1			0,03		
	Max.	10,5	0,15	0,2	0,6	0,08	0,3	0,3	0,07	0,06	0,10	0,15	Al



rissneigung im Vergleich zu bekannten Al-Cu-Basislegierungen, die ebenfalls sehr fest sind. Mit diesem Eigenschaftsprofil haben die Legierungen des Systems AlZnMgCu gute Potentiale, um zukünftig als sehr hoch feste Gusswerkstoffe in der Automobilindustrie und Luftfahrttechnik Anwendung zu finden.

O. Zak u. a. [27] führten vor dem Hintergrund, dass die klassische Druckgusslegierung AlSi17Cu4Mg (390) im Serienbetrieb nur sehr eingeschränkt nutzbar ist, Versuche mit modifizierten übereutektischen Legierungen durch. Danach zeichnet sich besonders die durch Zugabe von Mikrolegierungselementen modifizierte Legierung AlSi17Cu4Mg, im Druckgießprozess verarbeitet, durch die besten Gießeigenschaften aus. Diese modifizierte übereutektische Al-Legierung ist wie die anderen dieser Gruppe sehr gut für das Druckgießen geeignet, was sich neben einer sehr guten Fließfähigkeit in einer hervorragenden Vergießbarkeit und so gut wie nicht messbarem Verschleiß äußert. Verantwortlich hierfür ist insbesondere die niedrige Gießtemperatur und die durch Zugabe der Mikrolegierungselemente Calcium und Zircon deutlich abgesenkte Ausscheidungstemperatur des Primärsiliciums.

D. Jean und J. F. Major [28] erforschten die Beziehungen zwischen chemischer Zusammensetzung und mechanischen Eigenschaften der Aluminiumlegierungen des Typs AA206 bezüglich des Dauerfestigkeitsverhaltens. Die Aluminium-Kupfer-Magnesiumlegierungen der Legierungsfamilie 206 werden bevorzugt in der Luft- und Raumfahrt sowie im Fahrzeugbau eingesetzt, wobei jeweils verschiedenen mechanischen Eigenschaften (Festigkeit, Duktilität) der Vorzug gegeben wird. In Screening-Versuchen wurden die Auswirkungen der variierten Parameter Cu (4,2 bis 4,9 %), Mg (0,15 bis 0,35 %), Fe (0,1 bis 0,2 %) und Si (0,05 bis 0,15 %) bei konstantem Mn-Gehalt (alle Angaben Masse-%) sowie der Zellgröße (Sekundärdendriten-armabstand 43 und 73 µm) auf das Dauerfestigkeitsverhalten ermittelt. Die Versuche zeigten einen Anstieg der Lebensdauer bei der T7-Wärmebehandlung mit stärkerer Lösung der Legierungselemente und Verunreinigungen, während bei der T4-Wärmebehandlung eine leichte Abnahme der Lebensdauer mit Anreicherung Härte bildender Elemente zu verzeichnen war. Bei beiden Wärmebehandlungszuständen hing die Lebensdauer von der Zellgröße ab. Der Eisengehalt hatte im Rahmen der engen Gehaltsgrenzen dieser Versuche keinen Einfluss auf die Lebensdauer, wohl aber auf die Duktilität bei der T7-Wärmebehandlung. Im Vergleich mit entsprechenden Werten der Aluminiumgusslegierung A356-T6 lag die

Dauerfestigkeit der Legierung B206-T4 und -T7 deutlich höher, wobei die weniger aufwendige T4-Behandlung bessere Dauerfestigkeitseigenschaften aufweist.

**Zink**

Die Werkstoffe Zink und Kunststoff ergänzen sich gut bei der Fertigung von Funktionsteilen. Besonders interessant sind deshalb Hybridteile aus beiden Werkstoffen, bei denen gegossene Einlegeteile mit Kunststoff um- oder hinterspritzt werden, wodurch sich die herstellbare möglichen Variantenvielfalt und die Funktionalität der Bauteile erhöhen lassen. U. Schwab [29] stellt diese spezielle Verbundgießtechnik vor. Zur Herstellung der verwendeten metallischen Eingussteile kommen vor allem im Zinkdruckguss gefertigte Gussteile aus der Legierung ZL 0410 (Zamak) mit 4 Masse-% Al und 1 Masse-% Cu zum Einsatz. Als umgebende Kunststoffe sind Polyamid mit und ohne Glasfaserverstärkung oder Polyoxymethylen geeignet. Die Zinklegierungen und Kunststoffe werden beide im flüssigen Zustand unter hohem Druck in einer Form vergossen. Die für den Konstrukteur interessanten Eigenschaften der Zinkteile, wie Zugfestigkeit und Kerbschlagfestigkeit, werden angegeben und ein Parametervergleich zwischen Zinkdruckguss- und Kunststoffspritzteilen vorgenommen. Als Anwendungsbeispiele werden Waschmaschinenscharniere, Auto-Dachantennen, Gehäuse und Getriebegehäusen angeführt.

**Gusseisen**

In dem Schlußbericht des AiF-Forschungsvorhabens des Institutes für Gießereitechnik IfG, Düsseldorf, zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL) durch Legieren mit Stickstoff [30] wurde, nachdem ein wirtschaftliches Verfahren zur Stickstoffzugabe in die Gusseisenschmelzen entwickelt worden war, untersucht, wie sich dieser auf die mechanischen Eigenschaften von GJL auswirkt. Bei einer Stickstoffzugabe von 100 ppm ist danach eine Festigkeitssteigerung von bis zu 30 % möglich. Dies betrifft sowohl die statischen (Zugfestigkeit, E-Modul) als auch die zyklischen Eigenschaften (Umlaufbiegefestigkeit). Der Elastizitätsmodul steigt ebenfalls deutlich an. Der Mechanismus für die Festigkeitssteigerung durch Stickstoff ist die Verkürzung und Abrundung der Graphitlamellen sowie die Verringerung des Ferritanteils und die Erhöhung der Perlithärte. In komplexeren Gussstückgeometrien kann der Festigkeitszuwachs allerdings geringer ausfallen. Die derzeit in der Fachwelt diskutierte Alterung des Gusseisens (zeitabhängiger Festigkeitsanstieg) infolge submikroskopischer Stickstoffausscheidungen konnte im Rah-

men des Projektes nicht bestätigt werden. Als Obergrenze für den N-Gehalt in Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL) wurde 130 bis 140 ppm ermittelt, da es dort zur Ausscheidung von Gasblasen kommt, die allerdings noch keine Festigkeitseinbußen nach sich ziehen. Oberhalb 150 ppm Stickstoff sind die Gasblasen auch makroskopisch sichtbar und führen zur Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften. Bearbeitungsversuche haben allerdings ergeben, dass durch das N-Legieren die mechanische Bearbeitbarkeit des GJL etwas erschwert wird. Als Schneidstoff empfehlen sich CBN-Sorten, die aufgrund ihrer Zusammensetzung über eine ausreichende Härte bei gleichzeitig vergleichsweise hohen Zähigkeitskennwerten verfügen.

W. Knothe [31] berichtet über die Entwicklung eines Gusseisenwerkstoffs auf Basis des EN-GJS 500-7 mit besonderen Eigenschaften durch Legieren und Wärmebehandeln in der Frankenguss GmbH & Co. KG, Kitzingen. Der neue Werkstoff mit der Bezeichnung GJS-700-440-8 hat herausragende konstruktive Eigenschaften ( $R_{m \min} = 700 \text{ N/mm}^2$ ,  $A_{\min} = 8 \%$ , Schlagzähigkeit ungekerbt min. 40 J) und homogene Werkstoffeigenschaften. Die daraus hergestellten Bauteile sind hoch elastisch und eigenspannungsarm. Kennzeichen des Werkstoffs ist neben der Festigkeit das relativ gute Dehnungsverhalten. Er ist damit ein geeigneter Werkstoff für Konstruktionsteile im Fahrzeugbau, wo überwiegend Biege-Wechsel-Spannungen auftreten.

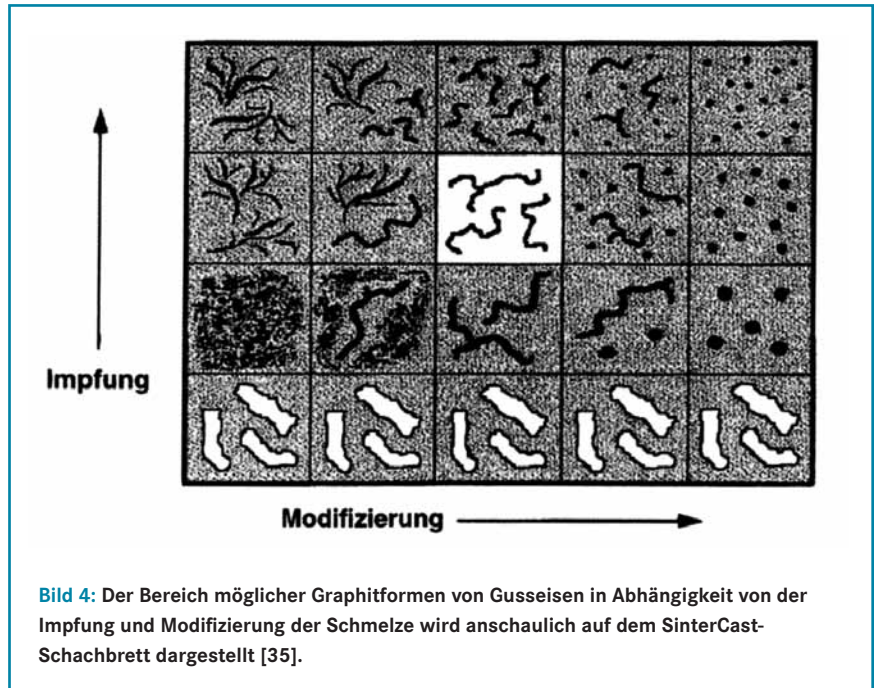
H. Werner und I. Lappat [32], [33] weisen darauf hin, dass mit zunehmender Bedeutung von Windenergieanlagen-Standorten, an denen teilweise Minustemperaturen herrschen, sowie der immer leistungsstärkeren Offshore-Anlagen der duktile Werkstoff Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) mit den Legierungen EN-GJS-400-18U-LT sowie ENGJS-350-22U-LT verstärkt in den Fokus der Konstrukteure rücken. Untersuchungen am Werkstoff EN-GJS-400-18U-LT erbrachten, dass nicht nur mindestens 18 % Dehnung, sondern aufgrund der hohen Kaltzähigkeit auch entsprechend gute Verformungs- und Torsionseigenschaften von 360 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. Diese Eigenschaften ermöglichen Festigkeitsberechnungen ohne die bisher üblichen Sicherheitszuschläge. Ferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit hat eine Zugfestigkeit von 320 bis 400 N/mm<sup>2</sup> bei 12 bis 22 % Dehnung und 10 bis 12 J Kerbschlagarbeit und das bei Temperaturen von -20 bis -40 °C. Die Gusseisenlegierung EN-GJS-400-18U-LT ist aus diesen Gründen der Standardwerkstoff für Bauteile von Windenergieanlagen, z. B. für Rotornaben, Maschinenträger, Blattanschlussadapter und Achszapfen. Mit diesem Werkstoff lassen sich Anlagengrößen von 800 kW bis 7,5 MW herstellen. Bei den wei-

terhin vorgestellten höher festen ferritischen Legierungen GJS-450-18, GJS-500-14 und GJS-600-10 handelt es sich um Neuentwicklungen, für die ein einphasiges ferritisches Gefüge mit eingelagertem Kugelgraphit kennzeichnend ist. Die Normsorten, wie EN-GJS-600-3, EN-GJS-700-2 und EN-GJS-800-2, mit Zugfestigkeiten von 600 bis 800 N/mm<sup>2</sup> und Streckgrenzen von 370 bis 480 N/mm<sup>2</sup>, erreichen Härten von 200 bis 335 HB. Trotz dieser hohen Festigkeitskennwerte können ausreichende plastische Eigenschaften von 2 bis 7 % Dehnung erzielt werden. Diese genormten Werkstoffe können nicht nur auf höhere Festigkeitskennwerte getrimmt, sondern auch mit Hilfe von Legierungselementen auf zu gewährleistende Härten ausgelegt werden. Die hoch festen ausferritischen oder bainitischen Gusseisenlegierungen mit Kugelgraphit (ADI) weisen sogar Zugfestigkeiten von 1000 bis 1400 N/mm<sup>2</sup> bei allerdings reduzierter Dehnung auf.

M. Gagne und C. Labrecque [34] befassen sich mit dem Eigenschaftsprofil von Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) für dickwandige Gussteile, da bei diesen Teilen die mechanischen Eigenschaften stark von den Gefügefehlern beeinflusst werden, die teilweise eine Abhängigkeit von der Gussteilgröße haben. Beispielsweise findet man Fehler wie Chunkygraphit, interzelluläre Seigerungen und Dross verstärkt in dicken Gussteilbereichen beziehungsweise in Bereichen mit hohem Gussstückmodul. Sie treten aber nicht ausschließlich in dickwandigen GJS-Gussteilen auf. Eingegangen wird auf die Ursachen für das Auftreten dieser Gefügefehler und deren Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften sowie die Bildungsmechanismen dieser Fehler. Auf deren Basis werden Möglichkeiten vorgeschlagen, das Auftreten dieser Fehler zu verhindern oder einzuschränken.

S. Hasse [35] sieht bessere Einsatzmöglichkeiten beim Werkstoff Gusseisen mit Vermiculargraphit (GJV) als Werkstoff für Motorenkomponenten im Vergleich zu den anderen Gusseisensorten. Aufgrund seiner besonderen Graphitbildung eignet sich der Werkstoff vor allem für Komponenten, die sowohl thermischen als auch mechanischen Belastungen ausgesetzt sind. Hierzu gehören beispielsweise Zylinderköpfe, Abgaskrümmer, Bremsenteile und Laufbuchsen. Es werden vier Verfahren zur Herstellung von Gusseisen mit Vermiculargraphit vorgestellt. Es ist mit allen eine sichere Herstellung dieser Gussteile möglich. Allerdings sind die Prozessparameter dazu in sehr engen Grenzen zu führen, was ein sehr sorgfältiges Arbeiten voraussetzt (Bild 4).

D. M. Stefanescu u. a. [36] weisen darauf hin, dass die mechanischen Eigenschaften von Gusseisen mit Kugelgraphit



**Bild 4:** Der Bereich möglicher Graphitformen von Gusseisen in Abhängigkeit von der Impfung und Modifizierung der Schmelze wird anschaulich auf dem SinterCast-Schachbrett dargestellt [35].

(GJS) und Gusseisen mit Vermiculargraphit (GJV) von der Gushaut beeinflusst werden. Die oberflächennahen Schichten beinhalten spezifische Charakteristiken sowohl aus der Oberfläche als auch aus dem direkt darunter liegenden Gefüge. Bedingt durch die Gushaut sind die mechanischen Eigenschaften des Gussteils typischerweise deutlich geringer als diejenigen, die an den allseitig bearbeiteten Normproben ermittelt wurden. Die technische Zielsetzung der gegenständlichen Arbeit war, die einzelnen Parameter zu identifizieren, die die Qualität der Gushaut in GJS und GJV definieren sowie eine Methode zur Messung der Gushautdicke zu entwickeln, um den Einfluss in dünnwandigen Gusseisenteilen von 2 bis 6 mm Wanddicke zu bestimmen. Im Rahmen der Untersuchungen konnte für die Zugfestigkeit und die Dehngrenze ein Gushautfaktor bestimmt werden. Dieser Wert sollte als obere Grenze angesehen werden, da nur eine Oberfläche der Testgeometrie eine Gushaut aufwies.

#### Stahl

L. Krüger u. a. [37] untersuchten das Fließspannungsverhalten und die Mikrostrukturentwicklung einer TRIP-Stahlgusslegierung bei hohen Dehnraten. Die untersuchte austenitische Stahlgusslegierung auf CrMnNi-Basis mit 0,03 % C, 15,5 % Cr, 6,1 % Mn, 6,1 % Ni, 0,9 % Si, 0,14 % Al, 0,03 % N, Rest Fe (alles Masse-%) mit einer Zugfestigkeit von über 800 MPa zeigte bei der Umformung einen ausgeprägten TRIP-Effekt, der zu einer hohen Festigkeit bei guter Verformbarkeit führt. Die Ursache dafür ist die mechanische Beanspruchung, wodurch die metastabi-

le austenitische Phase in  $\alpha$ -Martensit umgewandelt wird.

#### Kupfer

L. H. Kallien und H. Steinhart [38] berichten über Untersuchungen zur optimalen Herstellung druckgegossener Kupferläufer zur Steigerung des Wirkungsgrades von Elektromotoren. Bisher wurden für die Rotoren in Asynchronmotoren Aluminiumgussteile verwendet, die günstig im Druckgießverfahren hergestellt werden konnten. Kupfer hat aber eine deutlich bessere elektrische Leitfähigkeit als Aluminium, weshalb das Ziel verfolgt wurde, Rotoren aus Kupfer mit einem hohen Wirkungsgrad im produktiven Druckgießverfahren herzustellen. Dabei wurde die grundsätzliche Möglichkeit der Verarbeitung von Kupfer durch Druckgießen aufgezeigt, jedoch ist technologisch eine angepasste Vorgehensweise erforderlich. Das entsprechend im Projekt modifizierte und im vorliegenden Bericht ausführlich beschriebene modifizierte Druckgießverfahren ermöglicht die kostengünstige Herstellung der Kupferrotoren in großen Stückzahlen.

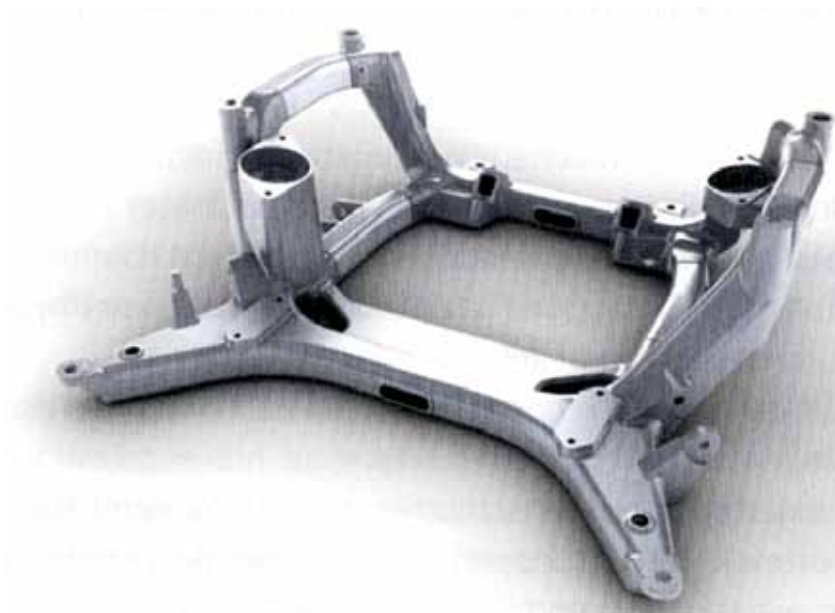
#### Sonderwerkstoffe

C. Lochbichler und F. Kolenz [39] weisen darauf hin, dass durch die Substitution von Stahlwerkstoffen durch Nickelbasislegierungen eine signifikante Effizienzsteigerung von kalorischen Kraftwerksaggregaten erreicht und somit ein nachhaltiger Beitrag zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes geleistet werden kann. Das Applikationspotential von Nickelbasislegierungen als substituierender Konstruktionswerkstoff ist bereits bekannt und werkstofftechnisch weitgehend erforscht. Die wesentliche Her-





**Bild 5:** Materialeinsparung um 1/3 durch Substitution einer tragenden Stahlstrukturkomponente für ein Fahrzeug durch ein Druckgussteil [41].



**Bild 6:** Subframes bestehen aus gegossenen Elementen, die entlang der Crashpfade durch Strangpressprofile verbunden sind [41].

ausforderung dieser Werkstoffsubstitution liegt in der technischen Darstellung realer Sandgussbauteile und im Speziellen in der technologischen Transformation der stahlspezifischen Prozess- und Fertigungsparameter auf die Nickelbasislegierungen. Diesbezügliche Versuche mit der Nickellegerung NiCr22Mo9Nb (Alloy 625) erfüllten die Kundenspezifikationen und wiesen damit die Machbarkeit nach.

K. Vollrath u. a. [40] stellen innovative Kunststoff-Metall-Verbundlösungen vor, auf die sich die Wagner AG in schweizer Waldstatt spezialisiert hat.

In der Produktentwicklung für leistungsfähige Bauteile in der Mechatronik und in Anwendungen unter rauen Betriebsbedingungen gewinnen solche Verbundbauteile, die die Vorteile verschiedener Werkstoffe

und Fertigungsverfahren in sich vereinigen, immer mehr an Bedeutung. Die wirtschaftliche Fertigung dieser Hybridbauteile setzt allerdings eine hohe Prozesskompetenz sowie ein breites Werkstoffwissen voraus, insbesondere deshalb, weil im Bereich mechatronischer Anwendungen oft höchste Qualität gefordert ist, die sich vor allem durch Maßgenauigkeit, Dichtigkeit oder Gratfreiheit bis in den Mikrobereich ausdrückt. Das Unternehmen kombiniert dabei den Kunststoffspritzguss und den Metalldruckguss von Aluminium- und Zinklegierungen, da es in beiden Bereichen über entsprechende Kompetenz und Fertigungstechnik verfügt. Anhand von Beispielen werden derartige Produkte vorgestellt, die hinsichtlich unterschiedlichster Anforderungen ausgelegt sind.

## Leichtbau

H. Fuchs [41] gibt einen Überblick über Neu- und Weiterentwicklungen bei Werkstoffen, Konstruktion, Gießverfahren und Wärmebehandlung bei der Honsel AG, Meschede. Es handelt sich dabei um Lösungen, die zu noch leichteren Bauteilen führen, deren Festigkeit und Duktilität zudem optimal an die Anforderungen angepasst werden können. Aus der Reihe von Neuentwicklungen werden folgende Bauteile hinsichtlich der Baugröße, des Materialeinsatzes, der Herstellung und insbesondere der Wärmebehandlung näher betrachtet: Spaceframe-Karosserie, bestehend aus Strangpressprofilen und Gussteilen, gegossene Strukturbauteile aus Aluminium (**Bild 5**), Hybridbauteile, Subframes der nächsten Generation (**Bild 6**) sowie neue Leichtbauwerkstoffe und Wärmebehandlungsverfahren.

G. Kopp u. a. [42] berichten über die Entwicklung eines Prototyps für eine Leichtbaukarosserie aus Magnesium und Aluminium, die 30 % Gewichtseinsparung erbrachte. Diese Ergebnisse wurden im Rahmen des EU-Projektes SuperLIGHT-Car, an dem 37 europäische Unternehmen aus den Bereichen Forschung, Fahrzeugtechnik und Zulieferindustrie beteiligt waren, erzielt und können nach vier Jahren Entwicklungszeit vorgestellt werden. Nach einer Analyse des Referenzfahrzeugs – eines VW Golf – wurde dabei die stahlintensive Vorderwagenstruktur konstruktiv unter Leichtbauaspekten modifiziert. Bauteile, deren Anordnung, Funktion und Kostenstruktur eine Integration in einem Gussteil sinnvoll machen, wurden zu einem einzigen großen Leichtmetallbauteil zusammengefasst. Dieser so genannte Federbeindom integrierte den oberen Längsträger, die Federbeinstütze und die Motor- und Getriebeaufhängung. In mehreren Entwicklungsschleifen zwischen Konstruktion und Simulation wurde die erforderliche Crashesicherheit des Bauteils erreicht und sogar übertroffen.

D. Bitsche [43] befasste sich mit der Entwicklung von Berechnungsmethoden zur Untersuchung und Gestaltung von Verbundgussstrukturen und Verbundbauteilen. Das Multi-Material-Leichtbaukonzept strebt danach, den besten Werkstoff und den besten Herstellungsprozess für jeden Bereich einer Struktur einzusetzen und die Vorteile der unterschiedlichen Werkstoffe miteinander zu kombinieren. Durch Verbundgießen lassen sich Gussteile mit anderen Bauteilen zu sehr leichten Konstruktionen verbinden. Das heißt, es kann der Gießprozess gleichzeitig als Herstellungs- und Fügeverfahren genutzt werden. Da die hierbei auftretenden Eigenspannungen die kraftschlüssige Verbindung und andere wichtige Ei-

genschaften, wie z. B. die Betriebsfestigkeit des Bauteils, bestimmen, ist eine Simulation des Abschreckvorgangs von zentraler Bedeutung. Der Autor macht deutlich, dass die Berücksichtigung dieser Abhängigkeit bei der Simulation des Abschreckvorgangs von Verbundgussbauteilen äußerst wichtig ist. Es werden praktische Beispiele für Stahl-Aluminium-Verbundgussbauteile mit form- und/oder kraftschlüssiger Verbindung vorgestellt. Im Allgemeinen konnte die Festigkeit der Verbindung dieser Bauteile von den Finite-Elemente-Simulationen gut vorhergesagt werden. Oft konnten bedeutende Verbesserungen durch vergleichsweise kleine und lokale Änderungen der Geometrie erreicht werden.

M. Peters und C. Leyens [44] weisen darauf hin, dass neben den klassischen Leichtmetalllegierungen auf Aluminium- und Magnesiumbasis zunehmend der Werkstoff Titan und seine Legierungen als Leichtbauwerkstoff an Bedeutung gewinnen. Der klassische Werkstoff der Luft- und Raumfahrt verfügt über herausragende Eigenschaften, wie hohe spezifische Festigkeit und ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit, weshalb er zunehmend auch in anderen industriellen Bereichen eingesetzt wird. Vor allem im Automobilbau wird wegen der von der EU angestrebten anspruchsvollen Reduzierungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Kraftfahrzeugen aller Art zur weiteren Verringerung des Kraftstoffverbrauches im Rah-

men des weiteren Leichtbaus auch auf den Werkstoff Titan gesetzt.

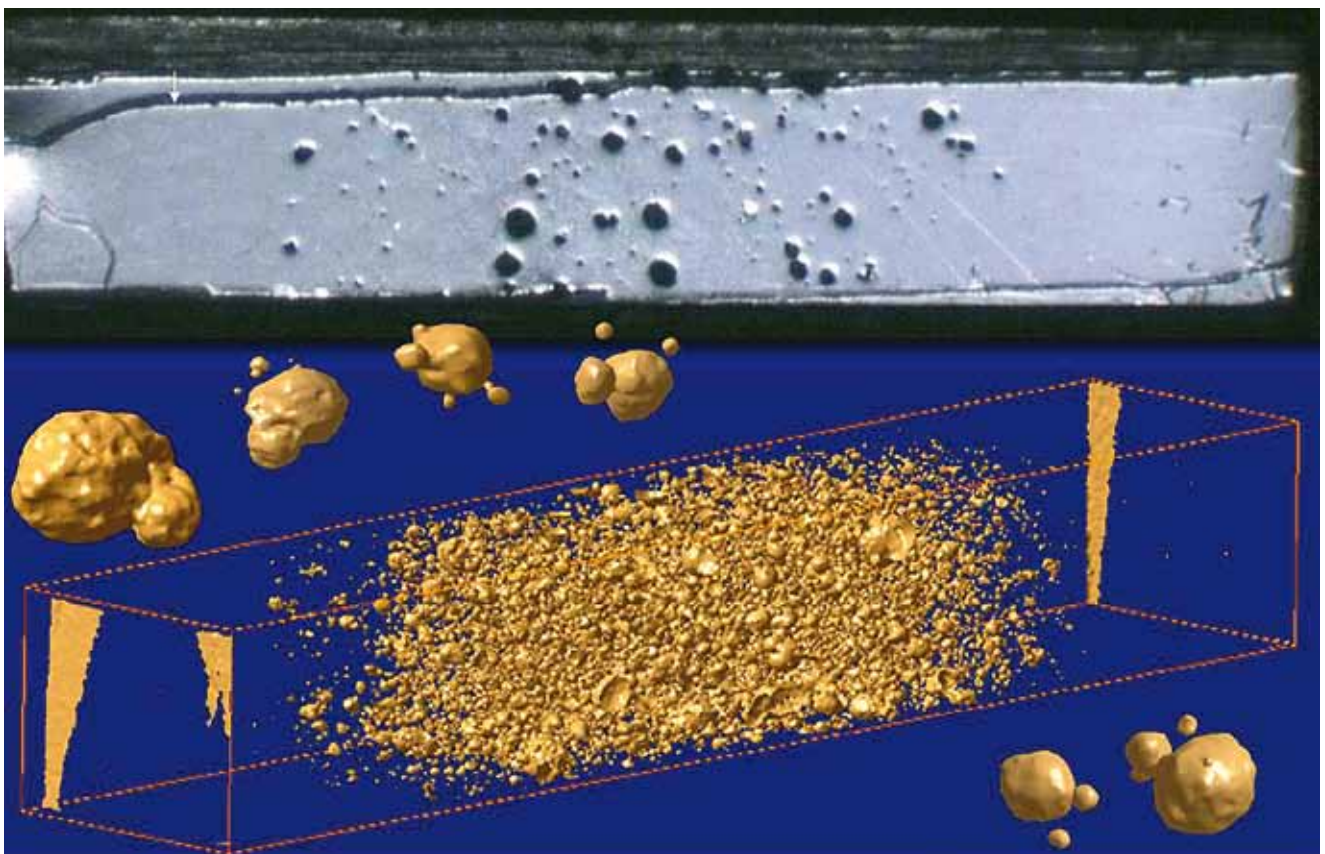
### Bauteileigenschaften

Bei der Spannungsrisskorrosion treten Risskonfigurationen auf, die mit konventioneller Ultraschallprüftechnik aufgrund der komplizierten Rissflächen nur unzureichend erfasst werden können. Nur eine Vielzahl von unterschiedlichen Einschaltwinkeln kann hier an den Rissflanken genügend Reflexionen hervorrufen, um mit Hilfe einer gezielten Saft-Analyse ein zusammenhängendes Rissgebilde zu rekonstruieren. R. Boehm u. a. [45] führten deshalb entsprechende Rissflächenanalysen durch. Die Untersuchungen wurden an künstlich nachgebildeten Risskonfigurationen verschiedener Neigungen und Krümmungen an Testkörpern mit ebenen und zylindrischen Oberflächen vorgenommen. Hierfür wurden entsprechende Modellrechnungen und Gruppenstrahlermessungen durchgeführt, die mit der Saft-Analyse ausgewertet wurden. An bildhaft dargestellten Ergebnissen wird aufgezeigt, welche Einzelheiten der Rissflankengestalt und -orientierung wiedergegeben werden können.

A. Berg-Pollack u. a. [46] berichten über die erstmalige Anwendung des Ultrasonic Impact Treatments (UIT)-Verfahrens bei Speichen gegossener Aluminiumräder. Die mit dem Verfahren auf das Bauteil aufge-

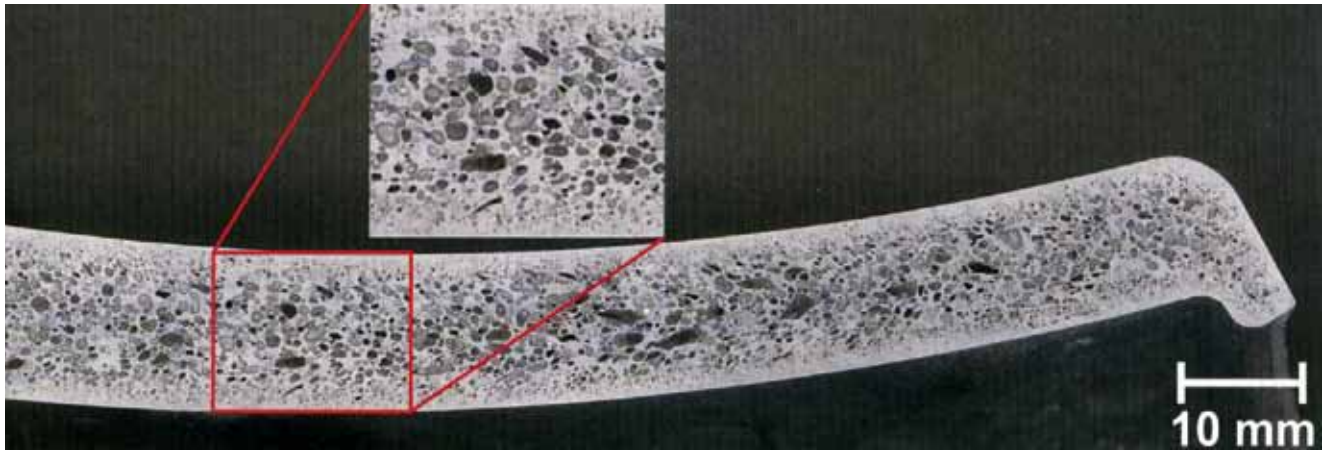
brachten mechanischen Impulse bewirken eine Erhöhung der Härte und eine Reduzierung der vorhandenen Porositäten in Oberflächennähe sowie eine Glättung der Oberfläche. Durch die plastischen Deformationen werden signifikante Druckeigen-spannungen erzeugt, die maßgeblich für die Steigerung der Schwingfestigkeit der UIT-behandelten Radspeichen aus der Aluminiumgusslegierung AlSi11Mg unter konstanten und variablen Amplituden verantwortlich sind. Die UIT-Technologie birgt somit ein hohes Potential zur Verbesserung der Lebensdauer und Sicherheit der Bauteile und zur Einsparung von Material und kann somit einen wesentlichen Beitrag zu konsequentem Leichtbau leisten.

D. Powazka u. a. [47] befassen sich vor dem Hintergrund der Bestrebungen der Automobilhersteller zum konsequenten Leichtbau mit den Auswirkungen der weiteren Gewichtsreduzierung bei Leichtmetallgussteilen aus Aluminium- oder Magnesiumgusslegierungen. Als Voraussetzung für die volle Ausschöpfung des Gewichtspotentials sind dabei neben den Auslegungsmethoden auch die technologischen Einflüsse des Herstellungsprozesses zu berücksichtigen (Bild 7). Für die Bemessung von Aluminiumgussbauteilen, die bezüglich ihrer Schwingfestigkeit sehr empfindlich auf unterschiedliche Gefüge, Sekundärdendritenarmabstand, Poren, Lunker usw. reagieren, stehen derartige Auslegungsmethoden



**Bild 7:** Poren können die Schwingfestigkeit von Gussteilen erheblich beeinflussen, weshalb sie mit der Computerthomographie erfasst und lokalisiert werden, um fertigungstechnologische gegenzusteuern zu können [47].





**Bild 8:** Querschnitt durch ein Gussteil mit Integralschaumstruktur [50].

derzeit nur eingeschränkt zur Verfügung. In diesem Beitrag wird aufgezeigt, welche Einflüsse die Schwingfestigkeit von Aluminiumkokillen- und -druckguss entscheidend bestimmen und wie sie bei der betriebsfesten Auslegung zu berücksichtigen sind. Die Untersuchungen zeigten, dass Poren und Dendritenarmabstände die Schwingfestigkeit von Al-Gussbauteilen nachhaltig beeinflussen. Dabei stellt der Sekundärdendritenarmabstand beim Kokillenguss die entscheidende Einflussgröße dar, während beim Druckguss die Porosität die bestimmende Rolle spielt.

F. Dörnenburg u. a. [48] berichten über eine Maßnahme von Federal-Mogul Nürnberg GmbH, Nürnberg, zur Erhöhung der Dauerfestigkeit des Muldenrands und/oder des Muldenrands von Aluminiumkolben, die DuraBowl-Technologie. Da die zukünftigen Dieselaggregate neben einer höheren spezifischen Motorleistung auch steigende Verbrennungsdrücke von mehr als 200 bar und Temperaturen von mehr als 400 °C ertragen müssen, was die heute gebräuchlichen Aluminiumkolbenlegierungen an die Grenze ihrer Dauerfestigkeit bringt, wurde diese Umschmelztechnologie entwickelt, bei der durch örtliches Umschmelzen der besonders kritischen Bereiche des Kolbens, wie dem Rand der Kolbenmulde, ein etwa zehn Mal feineres Gefüge eingestellt wird. Diese feinere Mikrostruktur ist deutlich weniger rissanfällig. Bei der DuraBowl-Technologie wird mit Hilfe eines modifizierten Wolfram-Inertgas-Lichtbogen-Schweißverfahrens (WIG) der Muldenrand lokal aufgeschmolzen, was dem Kolben zusätzliche Festigkeit verleiht, die besonders in kritischen Anwendungen zu einer betriebsfesten Auslegung der Kolben beiträgt. Auch bei weiter steigenden Temperaturen und Drücken im Brennraum von Dieselmotoren bieten Aluminiumgusskolben noch genügend Potential. Durch gezielte Modifikation des hoch belasteten Muldenrands und -grunds mit diesem neuen Verfahren lassen sich die

Widerstandsfähigkeit gegen hohe Temperaturen und Wechselbelastungen weiter steigern und die Neigung zur Rissbildung reduzieren, sodass eine vier bis acht Mal so lange Lebenszeit des Kolbens erzielt werden kann.

R. Puthli u. a. [49] untersuchten im Rahmen eines Forschungsvorhabens K-Knoten aus Stahlguss und Verbindungen von warm hergestellten Hohlprofilen mit Bauteilen aus Stahlguss bezüglich des Ermüdungsverhaltens an Bauteilen mit für den Brückenbau typischen Abmessungen. Die Auswertung der Ermüdungsversuche an Stumpfstoßen mit unterschiedlichen Ausführungsvarianten erfolgte anhand von Wöhlerdiagrammen. Im Einzelnen wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die Aufschluss über eventuelle Gussfehler, über Materialeigenschaften des verwendeten Stahlgusses, über den Einfluss der Schweißnahtausbildung auf die Ermüdungsfestigkeit und über das Rissfortschrittsverhalten geben. Darauf aufbauend wurde ein numerisches Modell mit Randelementen (Boundary-Element-Methode) entwickelt, mit dem für angenommene Gussfehler Spannungsintensitätsfaktoren an der Rissfront berechnet und das Rissfortschrittsverhalten simuliert wurden. Zur Verallgemeinerung dieser Ergebnisse wurden im Anschluss Parameterstudien durchgeführt, in denen der Einfluss der Materialeigenschaften und der durch den Brückentyp bedingten Knotengeometrie und -belastung auf die maximal zulässige Anfangsgröße von Gussfehlern untersucht wurde. Basierend auf diesen Ergebnissen werden praxisnahe Ausführungs- und Bemessungsempfehlungen für Verbindungen mit dickwandigen Hohlprofilen gegeben.

C. Körner und J. Hartmann [50] stellen einen an der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelten Druckgießprozess vor, mit dem die Herstellung sogenannter Integralschäume aus Leichtmetallen möglich ist (**Bild 8**). Metallische Schäume weisen eine ausgezeichnete Kombination von me-

chanischen, elektrischen, thermischen und akustischen Eigenschaften auf und bieten die Möglichkeit, Bauteile kostengünstig und mit einem hohen Grad an Designfreiheit für Anwendungen im Bereich der Schwingungsdämpfung, der Crashabsorption oder des Leichtbaus bei gleichzeitig hohen mechanischen Ansprüchen herzustellen. Die Autoren beschreiben die Eigenschaften und die Herstellung von Metallschäumen sowie die Technologien des Integralschaumgießens mit den Varianten Hochdruck-(High Pressure Integral Foam Moulding = HP-IFM) und Niederdruck-Integralschaumgießen (Low Pressure Integral Foam Moulding = LP-IFM) und stellen den nächsten Entwicklungsschritt vor: die Herstellung mikrozelluläre Metallschäume mit einer mittleren Porengröße im Bereich von 100 µm bei relativen Kerndichten von weniger als 30 %.

Durch Schichtverbundbauweise lassen sich die Eigenschaften von Bauteiloberflächen mit geeigneten Schichtwerkstoffen gezielt an Anforderungen anpassen, die vom vorgesehenen Grundwerkstoff nicht oder nur eingeschränkt erfüllt werden können. In klassischen Prozessketten hat der thermische Spritzprozess eine unabhängige Stellung in der abschließenden Bearbeitungsphase der Bauteile. F. W. Bach u. a. [51] stellen ein Verfahren vor, bei dem der thermische Spritzprozess unmittelbar in die Druckgussfertigung integriert wird. Im Gegensatz zum konventionellen Beschichtungsprozess wird dabei die Schicht nicht auf das Bauteil, sondern auf die Druckgießform oder entsprechende Wechseleinsätze appliziert und bei jedem Abguss als strukturierte Funktionsfläche auf das Bauteil übertragen. Der Transfer einer solchen Schicht von der Werkzeugoberfläche auf das Gussteil, auch als Transplantation bezeichnet, bedingt ein enges Prozessfenster bezüglich der Schichthaftung auf der Formoberfläche und auf dem Gussteil. Die Schichthaftung an der Werkzeugoberfläche muss groß genug sein, um während des Beschichtungsprozesses und



dem Formfüllen nicht abgelöst zu werden, jedoch gering genug, um sich beim Entformen vollständig vom Werkzeug abzulösen und zusammen mit dem Gussteil entnommen werden zu können.

Ergebnisse erster Gießversuche zur Transplantation von thermisch gespritzten Schichten im Druckgießverfahren auf Aluminium- und Magnesiumlegierungen werden präsentiert.

O. Mouquet u. a. [52] untersuchten die Dauerfestigkeit gegossener und geschmiedeter Bauteile, die stellenweise unbearbeitet bleiben und ihre rohe Oberfläche behalten. An diesen Stellen müssen durch den rauen Oberflächenzustand bedingt große Abstriche bei der Dauerfestigkeit in Kauf genommen werden.

Im Rahmen eines Projektes wurden Möglichkeiten untersucht, die Verfestigung solcher Oberflächen zu verbessern. Mittels eines Verfahrens zur Bearbeitung der Oberfläche, das vom Verfasser nicht benannt wurde, konnte an Proben aus den Werkstoffen EN-GJS-400-15 und AlSi7Mg0.6 eine deutliche Dauerfestigkeitssteigerung nachgewiesen werden. Für das Gusseisen mit Kugelgraphit konnte eine Steigerung der Dauerfestigkeit um 75 % und bei der AlSi-Legierung um 40 % erreicht werden, wodurch auf das übliche Kugelstrahlen verzichtet werden konnte.

## Gussanwendung

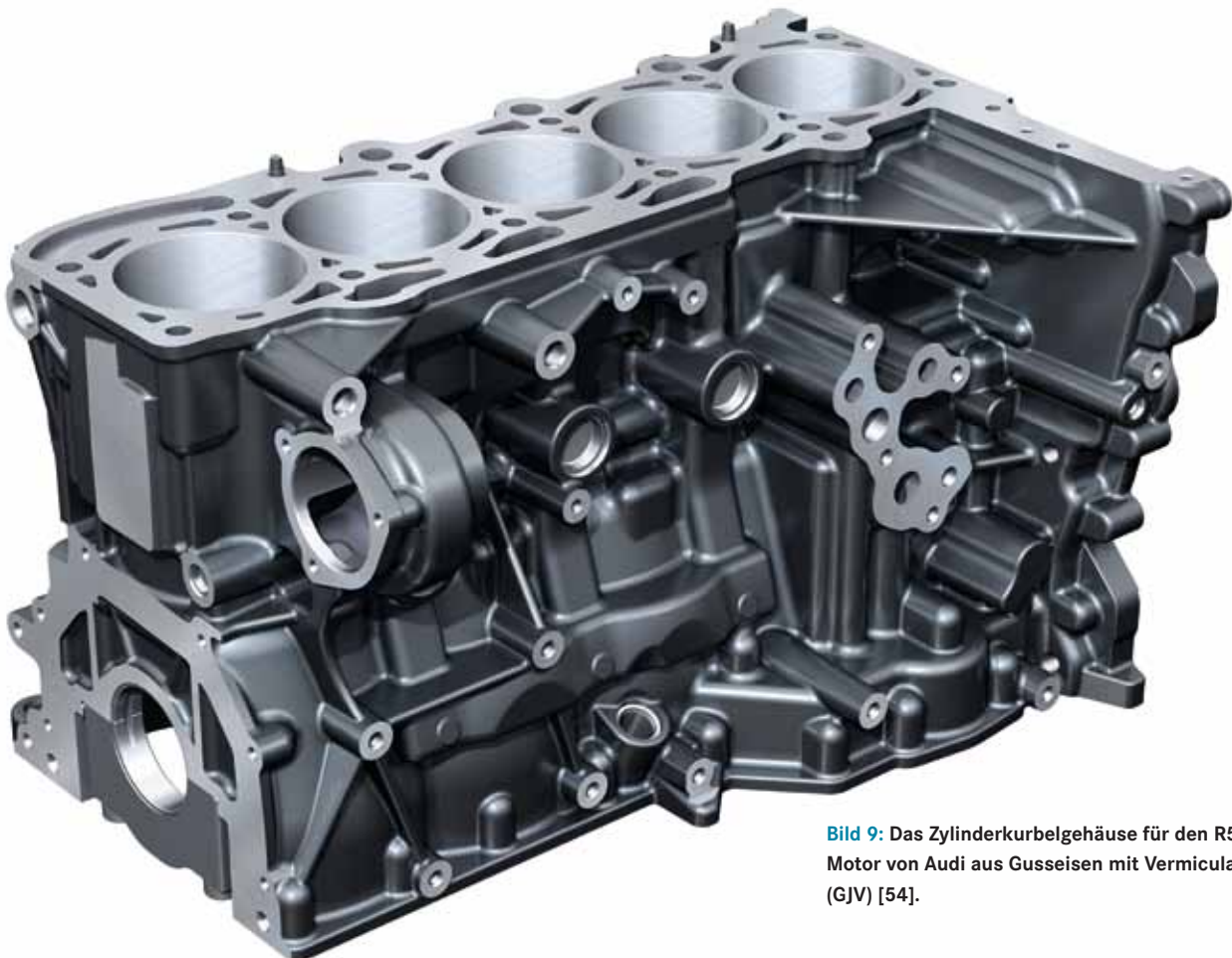
E. Dan u. a. [53] berichten, dass eine Dachhalterkonstruktion aus Magnesiumdruckguss mit einer eingepreßten Sinterstahlzahnstange durch Ausreißen der Zahnstange versagte. Über einen untauglichen Lösungsansatz, bei dem die Zahnstange vernietet wurde, konnte letztendlich eine Umkonstruktion des Bauteils als einteiliges Druckgussteil aus der Magnesiumgusslegierung AM60 mit integrierter Zahnstange zur Lösung des Problems führen. Der Wegfall der Fertigung der Sinterzahnstangen und der Fügeprozesse führte trotz Anfertigung der benötigten Druckgießform zu sinkenden Produktionskosten. Zudem war das einteilige Druckgießteil leichter.

M. Hesslinger u. a. [54] stellen das erste Zylinderkurbelgehäuse für hoch aufgeladene direkt einspritzende Ottomotoren aus Gusseisen mit Vermiculargraphit (GJV-450) vor (Bild 9), den die Audi AG im Frühjahr 2009 im TT RS auf den Markt gebracht hat. Im Nutzfahrzeug- und Pkw-Bereich ist der Einsatz von GJV als Werkstoff für Zylinderkurbelgehäuse für stark beanspruchte Dieselmotoren bereits seit einigen Jahren Stand der Technik. Da die Brennraumspitzendrücke der hoch aufgeladenen Ottomotoren bereits in der Nähe von Dieselmotoren ange-

langt sind, bietet sich GJV als Konstruktionswerkstoff für kompakte und hoch belastete Ottomotoren an. Audi hat hier mit der Entwicklung eines GJV-ZKG beim neuen 5-Zylinder-Motor mit Direkteinspritzung und Turboaufladung neue Wege beschritten. Die Materialeigenschaften von GJV stellen besondere Anforderungen an die Zerspanungswerkzeuge und Bearbeitungsanlagen, die im Beitrag beschrieben werden.

S. Hobohm [55] zeigt auf, wie mit Hilfe duktiler Gussrohren in Garmisch-Partenkirchen durch Wasserkraft aus Quellwasser der Region erzeugte umweltfreundliche Energie genutzt werden kann. Das 2007 gebaute Wasserkraftwerk wird über 3600 m mit duktilen Gussrohren DN 400 mit verschiedenen Außenbeschichtungen und Wanddickenklassen, je nach Druckzone und Einbaubedingung, versorgt. Für Rohre, die unter Verkehrsflächen verlegt wurden, kamen PUR-Longlife-beschichtete Rohre zum Einsatz, die anderen Rohre waren mit einer Zementmörtelumhüllung nach DIN EN 15 542 abgedeckt. Die Rohrstücke konnten ohne wesentliche Schweißarbeiten vor Ort verlegt werden.

K. Weber [56] berichtet über einen von der Sick Engineering GmbH, Ottendorf-Okrilla, entwickelten Ultraschallgaszähler Flowsic600, der vor allem in der Erdgasindustrie eingesetzt wird und präzise Mess-



**Bild 9:** Das Zylinderkurbelgehäuse für den R5-TFSI-Motor von Audi aus Gusseisen mit Vermiculargraphit (GJV) [54].



**Bild 10:** Die Gaszählergehäuse sind Kleinserienteile, die in nur 12 Wochen in verschiedenen Größen für 6- bis 36-Zoll-Rohre gegossen wurden [56].

daten zu Volumenstrom, Volumen und Gasgeschwindigkeit liefert. Für die Ausstattung des Margham-Gasfeldes in Dubai wurde der neue Ultraschallgaszähler mit Solarzellen ausgerüstet, da der sehr geringe Energieverbrauch der modernen Ultraschallmesstechnik dort einen Betrieb der Aggregate mit Solarenergie erlaubt. Berichtet wird in diesem Zusammenhang über die gesamte Projektabwicklung der Herstellung der Zählergehäuse als Edelstahl-gussteil (**Bild 10**) innerhalb von lediglich zwölf Wochen in der Schmolz + Bickenbach Gussgruppe.

In [57] wird über das Fertigungssegment kundenspezifisch angefertigter Großpressen, wie z. B. Freiformschmiedepressen, Gesenkschmiedepressen, Blechumformpressen, Richtpressen, in der Siempelkamp GmbH, Krefeld, berichtet, die bereits seit 125 Jahren Großpressen konstruiert und baut. Am Beispiel der neuen Richtpresse für die Dillinger Hüttenwerke, die für die Umformung von bis zu 300 mm dicken Blechen seit diesem Jahr eingesetzt wird, wird der Konstruktionsprozess solcher Unikatussteile erläutert. Eingegangen wird dabei auch auf die Vorteile des Einsatzes von Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) für die Herstellung der für solche großen Pressen benötigten dickwandige Gussteile.

R. Hanus und H. Schwarz [58] geben eine Übersicht über das Fertigungs-sortiment der voestalpine Giesserei, Linz (Österreich), die schwere Stahlgussteile bis 200 t für Dampf- und Gasturbinen und andere Industriezweige produziert. Diese Turbinen werden mechanisch und thermisch hoch beansprucht und erfordern eine aufwendige Wärmebehandlung. Aus dem Bestreben nach höheren Kraftwerkswirkungs-

graden durch höhere Dampftemperaturen ergeben sich auch höhere Anforderungen an die Auslegung und Dimensionierung der Gussteile. Die Technologie der Stahlerzeugung und der Ablauf des Gießprozesses einschließlich der aufwendigen Bauteilprüfung werden am Beispiel einer Gehäusehälfte mit einer Masse von 100 t aus einer Stahlguss-sorte mit 12 % Cr beschrieben.

R. Mille und A. Chabod [59] berichten über eine Substitution einer Stahlschweißkonstruktion durch ein Stahlgussknoten-teil. Die Barke Acergy Polaris dient zur Tiefseeverlegung von Öl-Pipelines im Meer. Am Heck der Barke befindet sich ein aus Rohrdreiecken zusammengesetzter Positionier-rahmen für Unterwasserarbeiten, Stinger genannt. Diese Konstruktion ist dynami-schen Beanspruchungen durch das Ge-wicht der Pipelinerohrstücke, den Wellen-gang und die Barkenbewegung ausgesetzt. Eine Vorausberechnung der Dauerfestig-keit der Rohr-Schweißkonstruktion des Stingers unter komplexer Beanspruchung ergab ein hohes Schadensrisiko bei einem geschweißten Rohr-Verbindungsknoten. Aus den vorgegebenen Dauerbeanspru-chungen und unter Berücksichtigung gieß-technischer Erfordernisse wurden deshalb Verbindungsknoten als GS-Mn5V-Gussteil konstruiert, gegossen und eingesetzt.

In [60] wird über Teile eines Befesti-gungs- und Spannsystems für Häuser be-richtet, die wegen des guten optischen Aus-sehens und der freien Legierungswahl, als Feingussteile gefertigt wurden. Die erfor-derliche Bauraumbeschränkung ließ sich nur mit den feingegossenen Bauteilen tech-nisch realisieren. Durch die Substitution eines komplett mechanisch bearbeiteten

Bauteils durch ein Feingussteil (**Bild 11**) ließen sich der Ausschuss, das Bauteilge-wicht und die Herstellungskosten reduzie-ren, wird in [61] berichtet. Die hochgradig genau gegossene Endkontur des Feingus-teils erforderte nur noch eine geringfügi-ge mechanische Bearbeitung. Sämtliche Bohrungen wurden gegossen und ermög-lichten eine Gewichtseinsparung am Gus-teil von 40 %.

S. Gibbs [62] stellt die zwölf Gewinner des Wettbewerbes zum Gussteil des Jah-res 2010 in den USA vor. Sieger wurde ein



**Bild 11:** Gegenüber dem komplett mechanisch bearbeiteten Bauteil ließen sich durch das endkonturnahe Feingussteil nicht nur der Ausschuss und die Herstellungskosten, sondern auch das Bauteilgewicht um 40 % senken [61].





**Bild 12:** Das Gussteil des Jahres 2010 in den USA ist ein Maschinenträger für eine Baumaschine aus Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS), der eine Stahlschweißkonstruktion ersetzt [62].

in Grünsand geformter Maschinenträger aus (GJS), der in einer Baumaschine eingesetzt wird (Bild 12). Hierdurch konnte ein ehemals geschweißtes Stahlbauteil ersetzt werden. Daneben werden noch andere Gussteile aus den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen, verschiedenen Gießprozessen und diversen Materialien präsentiert. Die zur Wahl stehenden Gussteile wurden nach folgenden Hauptkriterien bewertet: realisierte Gewichtsreduktion, Kostenersparnis, Minimierung des Ausschusses bzw. Innovationspotential.

#### Literatur:

- [1] BMBF-Forschungsbericht 5.1-36, FKZ 03WKU01 D, 2008.  
 [2] Giesserei 97 (2010) Nr. 5, S. 84-86.  
 [3] Giesserei 97 (2010) Nr. 8, S. 34-37.  
 [4] Giesserei 97 (2010) Nr. 8, S. 28-33.  
 [5] Giesserei 97 (2010) Nr. 3, S. 20-25.  
 [6] Transactions of the American Foundry Society 117 (2009), S. 7-22.  
 [7] Gießerei-Erfahrungsaustausch 53 (2009) Nr. 12, S. 24.  
 [8] BHM – Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 155 (2010) Nr. 7, S. 307-312.  
 [9] 30. Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik, Warberg, 3. – 5. September 2009. in: DVS-Berichte Nr. 268, S. 59-63, DVS-Verlag, Düsseldorf 2010.  
 [10] Gießerei-Erfahrungsaustausch 54 (2010) Nr. 3/4, S. 4-8.  
 [11] Strahlschweißen von Aluminium: Vorträge des DVS-Forschungsseminars, 28. Januar 2010 in Stuttgart. in: DVS-Berichte Nr. 266, DVS-Verlag 2010, S. 22-27 (+ 25 S. Folienpräsentation auf CD-ROM).  
 [12] DVS-Berichte Nr. 267, DVS-Verlag, Düsseldorf 2010, S. 56-62.  
 [13] Europäische Gusseisen- und Stahlguss-

sorten. Beuth-Verlag Berlin 2009, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage.

- [14] Stahlbau 78 (2009) Nr. 11, S. 800-814.  
 [15] Fonderie, Fondateur d'aujourd'hui (2010) Nr. 6, S. 20-32.  
 [16] DVS-Berichte Nr. 267, DVS-Verlag, Düsseldorf 2010, S. 212-214.  
 [17] Transactions of the American Foundry Society 117 (2009), S. 23-30.  
 [18] utg-Forschungsberichte 50 (2009), S. 1-124, Hieronymus, München 2009.  
 [19] Gießerei-Erfahrungsaustausch 53 (2009) Nr. 10, S. 21-25.  
 [20] Forschung in Bewegung. 9. Magdeburger Maschinenbau-Tage, 30. September – 1. Oktober 2009 in Magdeburg. Tagungsband, Magdeburg 2009, S. 321-328.  
 [21] BMBF-Forschungsbericht FKZ 03WKU02 B, 2009.  
 [22] Transactions of the American Foundry Society 117 (2009), S. 651-658.  
 [23] Transactions of the American Foundry Society 117 (2009), S. 241-249.  
 [24] Industrieanzeiger 131 (2009) Nr. 51/52, S. 30-31.  
 [25] Giesserei 97 (2010) Nr. 5, S. 34-42.  
 [26] Gießerei-Praxis 60 (2009) Nr. 11, S. 349-353.  
 [27] Druckguss (2010) Nr. 4, S. 95-101.  
 [28] Transactions of the American Foundry Society 117 (2009), S. 103-112.  
 [29] MM – Maschinenmarkt. Das Industrie-Magazin (2010) Nr. 38, S. 45-48.  
 [30] AIF-Forschungsbericht aus dem Institut für Gießereitechnik E 338, 2008, S. 11-84, AIF 14587N.  
 [31] Giesserei 97 (2010) Nr. 4, S. 32-35.  
 [32] MM – Maschinenmarkt. Das Industrie-Magazin (2010) Nr. 34, S. 44-47.  
 [33] Gießerei-Erfahrungsaustausch 54 (2010) Nr. 7/8, S. 38-41.

- [34] Gießerei-Praxis 61 (2010) Nr. 5, S. 135-140.  
 [35] Gießerei-Praxis 61 (2010) Nr. 5, S. 128-134.  
 [36] Gießerei-Praxis 61 (2010) Nr. 5, S. 141-153.  
 [37] Fortschritte der Kennwertermittlung für Forschung und Praxis, Werkstoffprüfung, Bad Neuenahr, 3.- 4. Dezember 2009. Tagungsband S. 35-40, Stahleisen-Verlag Düsseldorf 2009.  
 [38] BMBF-Forschungsbericht 5.1-68, FKZ 1727X05 D, 2009.  
 [39] Giesserei-Rundschau 56 (2009) Nr. 11/12, S. 193-197.  
 [40] Gießerei-Erfahrungsaustausch 53 (2009) Nr. 10, S. 4-9.  
 [41] Lightweight Design (2010) Nr. 3, S. 25-29.  
 [42] DLR-Nachrichten (2009) Nr. 124, S. 54-57.  
 [43] VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 18: Mechanik/Bruchmechanik Nr. 324, 5.1 A 36, VDI-Verlag, Düsseldorf 2009.  
 [44] Metall – Internationale Fachzeitschrift für Metallurgie 64 (2010) Nr. 6, S. 292-295.  
 [45] DGZfP-Jahrestagung 2009 Zerstörungsfreie Materialprüfung, ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, Münster, 18. – 20. Mai 2009 in: DGZfP-Berichtsband BB 115-CD (2009) 5.1-11.  
 [46] MP Materials Testing 52 (2010) Nr. 7/8, S. 496-501.  
 [47] Giesserei 97 (2010) Nr. 7, S. 34-42.  
 [48] Motortechnische Zeitschrift 71 (2010) Nr. 4, S. 246-249.  
 [49] Forschung für die Praxis. Heft P 591, Forschungsvereinigung Stahlanwendung, Düsseldorf 2010, S. 1-134.  
 [50] Lightweight Design (2010) Nr. 4, S. 28-34.  
 [51] Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 41 (2010) Nr. 6, S. 442-449.  
 [52] Fonderie, Fondateur d'aujourd'hui (2010) Nr. 2, S. 34-49.  
 [53] Diecasting Engineer 53 (2009) Nr. 6, S. 36-37.  
 [54] Giesserei 97 (2010) Nr. 5, S. 24-32.  
 [55] Drei R International 49 (2010) Nr. 1/2, S. 36-40.  
 [56] Gießerei-Erfahrungsaustausch 53 (2009) Nr. 12, S. 36-38.  
 [57] Umformtechnik 44 (2010) Nr. 2, S. 14-16.  
 [58] 32. Vortragsveranstaltung: Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, VDEh Düsseldorf, Düsseldorf, 27.11. 2009. In: Tagungsband S. 121-130, Herausgeber: Stahlinstitut/VDEh, Düsseldorf 2009.  
 [59] Fonderie, Fondateur d'aujourd'hui (2009) Nr. 290, S. 37-40.  
 [60] Incast 23 (2010) Nr. 1, S. 22-23.  
 [61] Incast 23 (2010) Nr. 1, S. 24-25.  
 [62] Modern Casting 100 (2010) Nr. 6, S. 18-25.