



IM FOKUS



Gießereitechnik

AKADEMISCHE INTERESSENGEMEINSCHAFT GIESSEREITECHNIK

Ingenieurwissenschaften

JAHRESMAGAZIN

ISSN 1618-8357
EUR 9,80

Herausgegeben vom Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen





Sie erreichen die einzelnen Hochschulinstitute über die Website der akaguss.de

Die Mitglieder der akaGuss

Gießerei-Institut, RWTH Aachen

■ Prof. Dr.-Ing. Andreas Bührig-Polaczek

Gießerei-Technologie Aalen – GTA, Hochschule Aalen

■ Prof. Dr.-Ing. Lothar Kallien

Institut für Metallurgie, Abteilung Gießereitechnik, TU Clausthal

■ Prof. Dr.-Ing. Babette Tonn

Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark

■ Niels Skat Tiedje, Associate Professor

Gießereitechnik – GTK Kassel, Universität Kassel

■ Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier

Institut für Produktion und Informatik – Technologietransferzentrum Hochschule Kempten

■ Prof. Dr.-Ing. Dierk Hartmann

Lehrstuhl für Gießereikunde, Montanuniversität Leoben

■ Prof. Dr.-Ing. Peter Schumacher

TUM UTG / Fraunhofer IGCV, Gießereitechnik München

■ Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

IM FOKUS



Gießereitechnik

AKADEMISCHE INTERESSENSGEMEINSCHAFT GIESSEREITECHNIK

Ingenieur
wissenschaften
2023



Forschung und Entwicklung in einem herausfordernden Umfeld

Die internationalen Krisen haben den Produktionsstandort Mitteleuropa signifikant verändert und werden auch in Zukunft sicherlich noch viel Bewegung bezüglich Produkten und Lieferketten verursachen. Die Gießerei-Industrie als klassischer Zulieferbereich wird sich diesen Veränderungen stellen müssen, um auch weiterhin im internationalen Wettbewerb erfolgreich zu sein. Daher ist es sicherlich keine neue Erkenntnis, dass einerseits in sich wandelnden Industriesektoren neue Möglichkeiten für Gießereiprodukte gesucht werden müssen und andererseits neue Möglichkeiten für die gießereitechnische Herstellung essentiell für die Wettbewerbsfähigkeit der Gießereibranche in Hochlohnländern mit hohen Energiekosten sind.

„Die Akademische Interessensgemeinschaft Gießereitechnik“ (akaGuss) ist eine Arbeitsgemeinschaft von Professuren aus Deutschland, Österreich und Dänemark, die sich seit 2013 gemeinsam im Bereich der Gießereitechnik engagieren. Wir unterstützen die Industrie dabei, die Zukunft durch innovative Techniken und vorausschauenden Ideen aktiv zu gestalten. Es ist das ausdrückliche Ziel, durch strategische Kooperationen mehr Forschungs- und Entwicklungsprojekte zu generieren und damit die Geschäftsfelder und das Know-how der Unternehmen unserer Branche weiterzuentwickeln. Diese kooperative Forschung und Entwicklung mit mehreren Partnern wird aufgrund knapper finanzieller Ressourcen sicher an Bedeutung gewinnen.

Die Ausbildung des akademischen Nachwuchses ist ein weiterer Schwerpunkt unserer Arbeit, mit leider auch hier zunehmend herausfordernden Randbedingungen. Eine Besonderheit in Deutschland ist die langjährig erprobte Zusammen-

arbeit in funktionierenden Netzwerken, im Rahmen von Fachgremien, in gemeinsamen Projekten und vieles mehr. Unsere Industrie, Hochschulen, Institute und Forschungsstellen zeichnen sich durch äußerst kompetente Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus und sie besitzen eine hervorragende Ausstattung mit modernen Anlagen. Diese vielfältigen Chancen sind anderswo in Europa und weltweit nur vereinzelt anzutreffen. Sie gilt es zu nutzen und in strategische und erfolgreiche Allianzen und Projekte umzusetzen.

Wir, die in der akaGuss organisierten Kolleginnen und Kollegen, freuen uns auf den Austausch mit Ihnen, liebe Leser und Leserinnen.

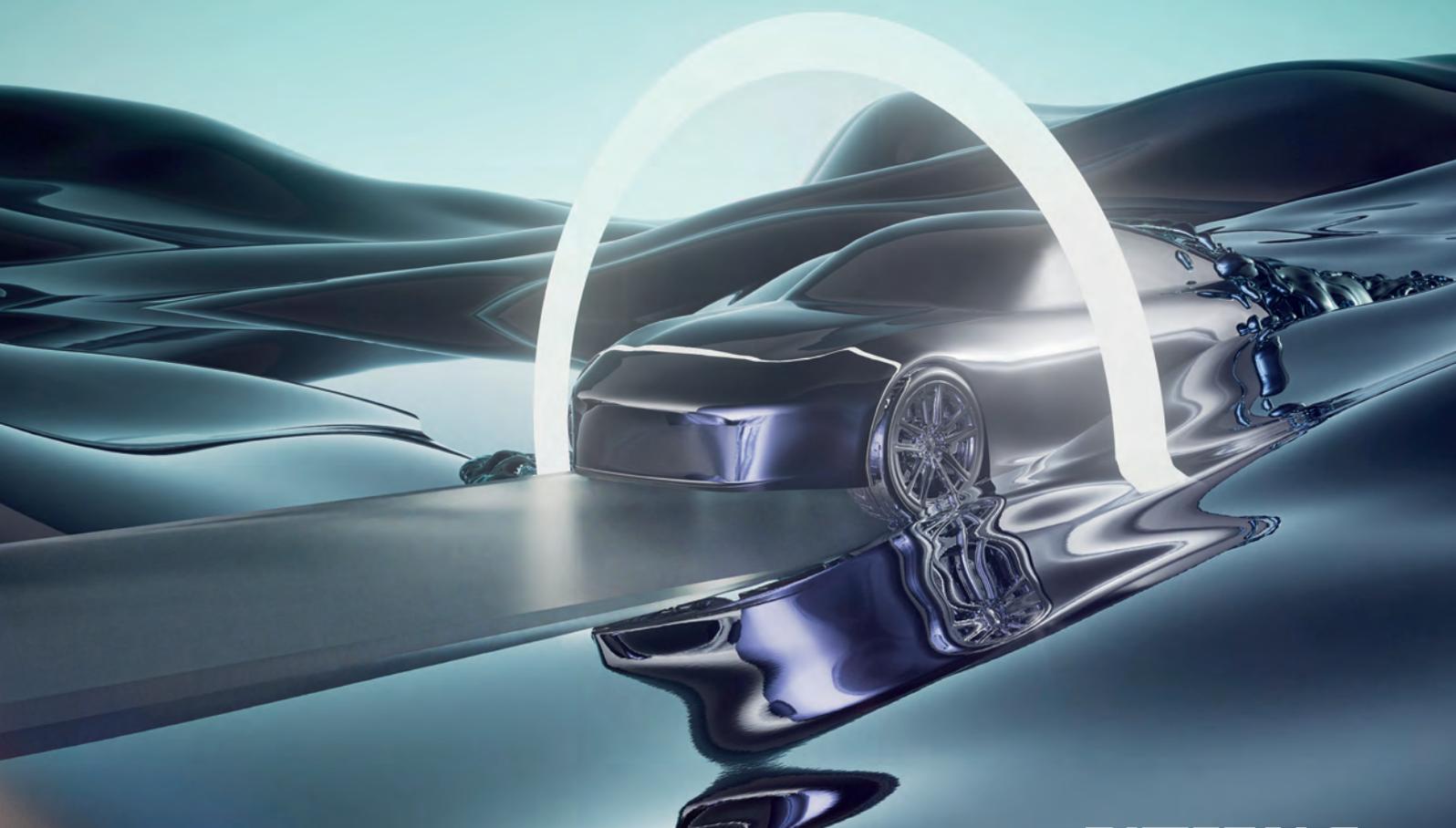
Ihre akaGuss

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk
Sprecher akaGuss
Lehrstuhl für Umformtechnik
und Gießereiwesen der Technischen
Universität München

Megacasting unveiled.

Open House event

13.-16. Juni, 2023
St. Valentin (Linz), Österreich



Besuchen Sie unser Open House und erleben Sie die Carat 840 – unsere 8.400 Tonnen Druckgiesslösung – live!

Nutzen Sie die Chance, sich mit Branchenexperten über nachhaltige Anwendungen, neue Funktionen sowie Innovationen im Druckgussbereich auszutauschen.

Scannen Sie den QR Code und melden Sie sich jetzt an!



Innovations for a **better world.**

BUHLER

Inhaltsübersicht

Die Mitglieder der akaGuss	U2
Sie erreichen die einzelnen Hochschulinstiute über die Website der akaguss.de	
Forschung und Entwicklung in einem herausfordernden Umfeld Vorwort	2
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk	
Sprecher akaGuss Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München	
Das Gießerei-Institut der RWTH Aachen – Partner für Forschung und Industrie	14
RWTH Aachen Gießerei-Institut	
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Bührig-Polaczek	
Hochschule Aalen: Innovationen in Druckguss	24
Hochschule Aalen Gießerei Technologie Aalen – GTA	
Prof. Dr.-Ing. Lothar Kallien	
Gießereitechnik an der TU Clausthal	38
TU Clausthal Institut für Metallurgie	
Prof. Dr.-Ing. Babette Tonn	
Research in foundry technology and solidification at the Technical University of Denmark	50
Technical University of Denmark Department of Mechanical Engineering	
Niels Skat Tiedje, Associate Professor, Ph.D.	
Modernes GTK-Gießtechnikum konnte durch einen 3D Formstoffdrucker und eine Rheometal-Anlage erweitert werden	58
Universität Kassel Lehrstuhl für Gießereitechnik – GTK	
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier	
Datenbasierte Verfahren zur Steigerung der Energieeffizienz beim induktiven Schmelzen	68
Hochschule für angewandte Wissenschaften Kempten Labor für Werkstofftechnik und Betriebsfestigkeit	
Prof. Dr.-Ing. Dierk Hartmann	
Montanuniversität Leoben – Lehrstuhl für Gießereikunde	76
Montanuniversität Leoben Department für Metallurgie	
Prof. Dr. Dipl.-Ing. Peter Schumacher	
Gießereitechnik München – Forschung durch zwei starke Partner	82
Fraunhofer IGCV TUM UTG	
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk	
Impressum	U3



**Sustainable
Reliable
Quality**

HOESCH Group

Germany

Phone +49 (0) 2421 809 0

contact@hoesch-metallurgie.com

hoesch-metallurgie.com

Nachhaltigkeit durch vernetztes Wissen in der Entwicklungsphase gegossener Bauteile

Mit der frühzeitigen Simulation von Prozessen vermeiden Unternehmen nachträgliche Fehler. Sie sparen damit zusätzliche Korrekturschleifen und profitieren doppelt: Sie verringern sowohl ihre Kosten als auch ihren Energieverbrauch. Dadurch trägt Prozess-Simulation, bereits in der Entwicklungsphase implementiert, auch zu mehr Nachhaltigkeit bei. Nachhaltigkeit, Energiewende und CO₂-Reduktion sind und werden Trendthemen bleiben. An nachhaltigem, energie- und ressourcensparendem Wirtschaften führt kein Weg mehr vorbei – auch und vor allem in energiehungrigen Branchen, wie der Gießereibranche. Als elementaren Beitrag dazu liefert die virtuelle Abbildung von Fertigungsprozessen schon in der Produktentwicklungsphase wichtige Erkenntnisse.

Wie hilft Gießprozess-Simulation, nachhaltig zu produzieren?

Anforderungen an Gusskomponenten steigen. Zeit- und Kostendruck nehmen zu. Gleichzeitig werden Machbarkeit und Fertigungsrestriktionen

Interviewpartner:

**Dr.-Ing. Marcus Schopen,
MAGMA GmbH**

Kontakt

MAGMA GmbH

Kackertstraße 16-18
D-52072 Aachen
Tel.: +49 (0)241 88901-0
Fax: +49 (0)241 88901-119
info@magmasoft.de
www.magmasoft.de

onen von Gussteilen oft zu spät bewertet. Ist ein Serienprozess dann nicht robust, entstehen hohe Ausschussraten und Folgekosten.

Unternehmen müssen es schaffen, schon beim Produktdesign Qualitätsanforderungen zu identifizieren und zu definieren. Hier hilft die Prozess-Simulation. Sie wird häufig angewendet, nachdem die Produktion angelaufen ist, um Fehler zu beheben. Das ist zu spät! Das wahre Potential der Gießprozess-Simulation entfaltet sich, wenn Unternehmen sie in den Produktentstehungs-Prozess integrieren. Betriebe identifizieren so Fertigungsrestriktionen frühzeitig, kalkulieren Prozessrisiken und -schwankungen ein und vermeiden Fehler bevor sie entstehen.

Welche Verbesserungsmöglichkeiten bietet MAGMASOFT® in diesem Zusammenhang?

MAGMASOFT® unterstützt Unternehmen dabei, die gesamte Prozesskette zu optimieren. Die Simulation liefert verlässliche Vorhersagen über das Bauteilverhalten und Gießprozess lassen sich von Beginn an robust ausgelegt. Ein erfahrener Anwender reduziert die Simulationszeit und die Anzahl energieintensiver Anfahrteile auf ein Minimum. Dadurch kann das Unternehmen Ressourcen optimal einsetzen: Werden Ressourcen in einem Prozess gespart, werden sie in einen anderen integriert. Das ermöglicht, Kosten zu reduzieren und Ressourcen einzusparen und zwar signifikant bei jedem einzelnen Gussteil. Dadurch – und durch Synergieeffekte – steigt die Nachhaltigkeit einer einzelnen Prozesskette und die Wettbewerbsfähigkeit des gesamten Unternehmens. Eine Win-Win-Situation für Unternehmen und Umwelt.

Welche Perspektiven und Chancen gibt es Ihrer Meinung nach für eine nachhaltigere Produktion?

Der Einsatz von Simulation bereits in der Planungsphase generiert Wissen. Es ist die Basis für eine nachhaltige Prozesskette. Hier hört die Reise noch nicht auf: Prozessdaten und Expertenwissen ergänzen Simulationsdaten ideal. In Zukunft sollten alle Datenquellen miteinander vernetzt und Wissen aufbereitet werden. Das schließt auch den Anwender als Wissensträger mit ein. Wenn Unternehmen es mit Hilfe von MAGMASOFT® schaffen, dieses Wissen auszuwerten und verfügbar zu machen, können sie es gewinnbringend für Folgeprojekte nutzen. Fertigungsunternehmen werden so in der Lage sein, Problemursachen zu verstehen und zu beheben, bevor sie überhaupt auftreten. Sie vermeiden damit Ausfallzeiten, reduzieren die Entwicklungszeit und beschleunigen die Prozessgeschwindigkeit enorm.

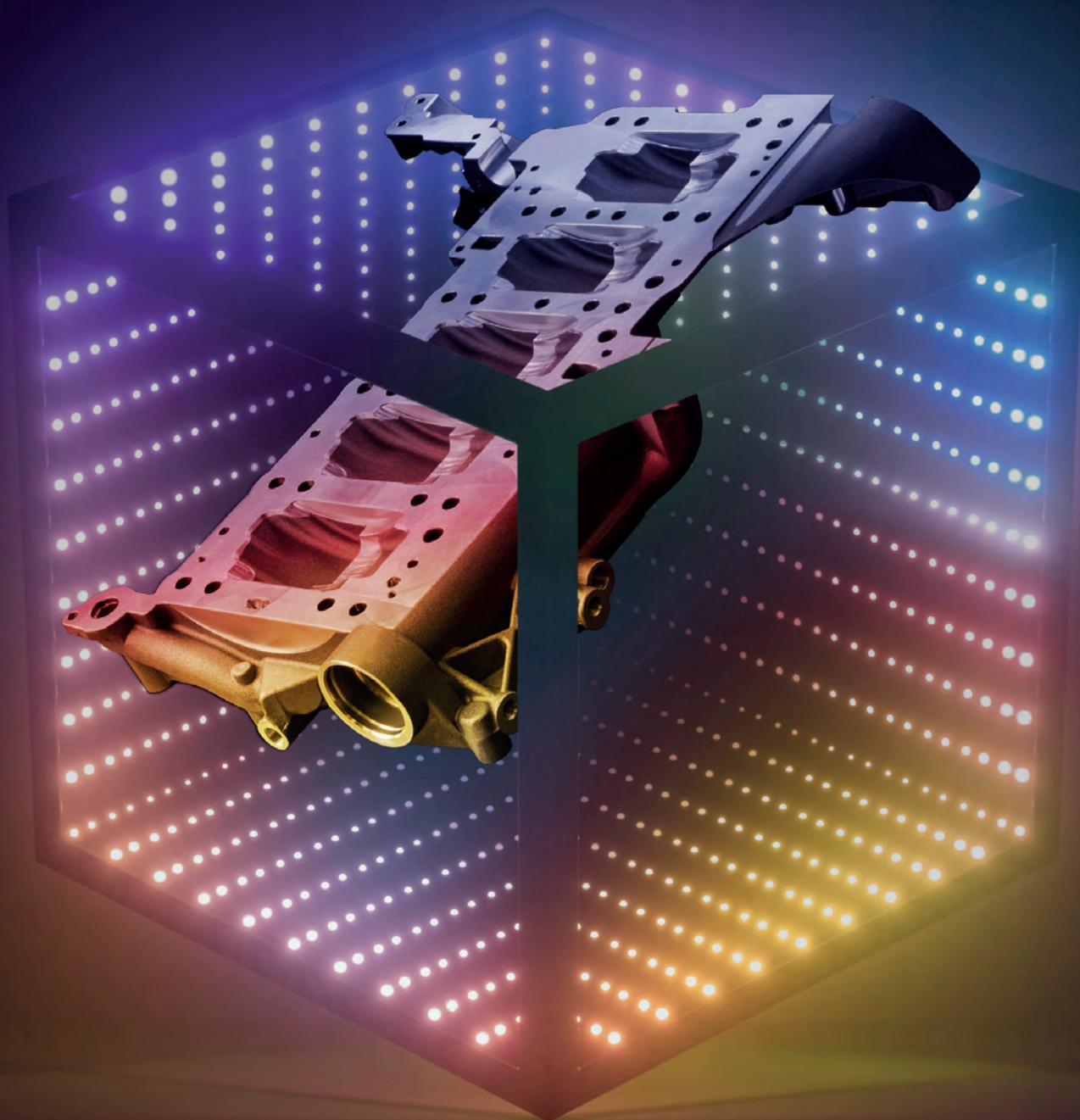
Gleichzeitig steckt viel Potential darin, Gießprozess-Simulation als Kommunikationswerkzeug sowohl zwischen Konstrukteur und Gießer als auch zum Datenaustausch zwischen Software und Maschine zu nutzen. Werden Prozess- und Simulationsdaten ausgetauscht, lassen sich Synergien nutzen, Rechenmodelle verfeinern und bestehendes Wissen erheblich erweitern. Wissen, das den gesamten Zyklus eines Prozesses abdeckt, wird zukünftig zu einer absoluten Notwendigkeit für nachhaltiges und wirtschaftliches Produzieren. Unsere Aufgabe dabei ist, unsere Kunden weiterhin zu unterstützen, MAGMASOFT® frühzeitig zu implementieren und prozessübergreifend anzuwenden.

Casting Knowledge. In a Software.

MAGMA

Committed to Casting Excellence

MAGMASOFT® 6.0



GIFA 12. - 16. Juni 2023



Düsseldorf
Halle 12
Stand A19 - A20



MAGMASOFT®
autonomous engineering

Inserentenverzeichnis

BEHRINGER GmbH	9
Mittelrheinische Metallgießerei Heinrich Beyer GmbH & Co. KG	12
Blue Power Casting Systems GmbH	48
Bühler AG	3
Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co KG	35
Erdwich Zerkleinerungs-Systeme GmbH	56
FONDIUM Group GmbH	10
HOESCH Group	5
HITACHI	9
Isselburg Guss und Bearbeitung GmbH	13
KLEIN Anlagenbau AG KLEIN Stoßwellentechnik GmbH	23
MAGMA GmbH	6
MARPOSS GmbH	36
Messe Düsseldorf	U4
Rösler Oberflächentechnik GmbH	57
RWP Gesellschaft beratender Ingenieure für Berechnung und rechnergestützte Simulation mbH	37
Saveway GmbH & Co. KG	22
RUDOLF UHLEN GmbH	22



BEHRINGER

INDUSTRIE | MASCHINENBAU | AUTOMOTIVE

**Gussteile aus Grauguss (EN-GJL)
und Sphäroguss (EN-GJS)**

BEHRINGER GmbH | Maschinenfabrik & Eisengießerei | Industriestraße 23 | 74912 Kirchartd

www.behringer.net

**NO ONE
IS MORE
METAL
THAN US**

HITACHI
Inspire the Next

**OE750 – NEXT LEVEL
OES METALLANALYSE**

Der neue Hitachi OE750 macht leistungsstarke Metallanalyse dank bahnbrechender Technologie erschwinglich.

Erfahren Sie mehr über den OE750: hhtas.net/oe750-de

oder live auf der GIFA 2023, Stand 11E40



Eisenguss neu denken – Nachhaltige Leichtbau-Lösungen aus einem Guss

Gießen gehört zu den ältesten Verfahren, um Bauteile in großer Stückzahl wirtschaftlich herzustellen und ist sowohl in der Automobilindustrie als auch im Maschinenbau nicht mehr wegzudenken. Die sich stetig verändernden Rahmenbedingungen sorgen dabei immer wieder für neue Herausforderungen. Die Mobilität von morgen umweltfreundlich weiterzuentwickeln, bleibt nach wie vor eine der wichtigsten und gleichzeitig spannendsten Aufgaben unserer Zeit. Sowohl Automobilhersteller als auch Zulieferer arbeiten intensiv daran, mit unterschiedlichsten Ansätzen Fahrzeuge nachhaltiger zu gestalten. Dabei wird immer häufiger nicht nur auf den Betrieb eines Fahrzeugs geschaut, sondern auch auf den ökologischen Fußabdruck der Produktion geachtet.

Autor: Guido Rau
Leiter F&E FONDIUM Group GmbH
guido.rau@fondium.eu

Doch eine CO₂-Neutralität ist zunächst einmal vor allem eine Vision. Deren reale Umsetzung ist höchst komplex, da unterschiedliche Zielkonflikte zu Tage treten und aufgelöst werden müssen. Wirtschaftliche Gesichtspunkte auf der einen Seite, ein verantwortungsvoller Umgang mit Energie und Ressourcen auf der anderen, führen zu äußerst konträren Aufgabenstellungen. Dieses Thema gewinnt weiter an Bedeutung. Aktuelle geopolitische Probleme werfen hierauf weitere Schatten und lassen die Zusammenhänge zwischen Umwelt und Politik deutlicher werden.

Nicht nur der Betrieb von Fahrzeugen verursacht unerwünschte Schadstoffe, bereits die Rohstoffgewinnung und Herstellung der Einzelkomponenten haben Einfluss auf die Umwelt und rücken weiter in den Vordergrund der Betrachtung. Gießereien stehen dabei in einem besonderen Fokus: sie haben bei der Herstellung von Bauteilen einen großen Bedarf an Einsatzstoffen und Energie. Ein reines Greenwashing kann langfristig gesehen nicht zielführend sein. Es sind vielmehr wirklich wirksame Schritte notwendig, um die Wettbewerbsfähigkeit des Herstellverfahrens und damit auch die des Unternehmens zu erhalten. Dafür sind Innovationen in allen Disziplinen notwen-

dig, ein Out-of-the-box-Denken und manchmal auch einfach nur die kontinuierliche und unbeirrbarere Optimierung. Um das Thema nachhaltig verbessern zu können, ist zunächst eine methodische Analyse notwendig: die CO₂-Bilanz. Entlang dieser lassen sich systematisch effektive Lösungsansätze erarbeiten und validieren.

FONDIUM nutzt bereits mehrere Bausteine, um Guss-Komponenten umweltfreundlich zu produzieren. Dazu gehören das Recycling von wertvollem Stahl mithilfe von Blechpaketen, Leichtbau durch Bionik, um den CO₂-Footprint bereits bei der Entwicklung zu reduzieren, sowie die Einsparung von Primärenergie durch Eigenstromgewinnung und Restwärmenutzung der entstehenden Prozesswärme.

Das Gießen bietet zahlreiche Möglichkeiten, umweltfreundliche und bezahlbare Komponenten in Großserie zu realisieren. Durch hohe Gestaltungsfreiheit und den richtigen Werkstoff an der richtigen Stelle lassen sich durch dieses Verfahren interessante und wettbewerbsfähige Lösungen herstellen.

FONDIUM will damit auch in Zukunft ein breites Spektrum an attraktiven Lösungsansätzen anbieten und diese kontinuierlich weiterentwickeln.

Kontakt

FONDIUM Group GmbH
Flurstraße 15-17
D-40822 Mettmann
www.fondium.eu



FONDIUM

Eisenguss neu denken

Aus Tradition schaffen wir nachhaltig Neues aus Eisenguss. Mit Leichtigkeit bringen wir die Ideen unserer Kunden in Form.

FONDIUM ist ein innovativer Lösungsanbieter für Eisengusskomponenten für die Automobilindustrie und neuerdings auch im B2C-Bereich.

Mit ca. 1.800 Beschäftigten an zwei Standorten (Singen und Mettmann) meistern wir die Herausforderungen und Aufgaben der Zukunft als ONE FONDIUM TEAM.

Wir pflegen eine moderne, offene und familienfreundliche Unternehmenskultur, in der unsere Werte: Wertschätzung, Pioniergeist, Verantwortung und Vertrauen über alle Ebenen hinweg gelebt werden.

Hochqualifizierte und motivierte Mitarbeitende sind unsere Zukunft, weshalb die Ausbildung junger Nachwuchskräfte sowie die Weiterentwicklung unserer Mitarbeitenden einen hohen Stellenwert einnehmen.

Auch in der Produktion unserer Gusskomponenten gehen wir mit dem Trend der Zeit und legen Wert auf Nachhaltigkeit, CO₂-Reduktion und Leichtbau. Durch die Nutzung unserer Abwärme in vielerlei Hinsicht, das Einschmelzen von Schrottpaketen als Abfallprodukte der Industrie sowie das wiederverwerten unseres Ausschusses bezeichnen wir uns als grüne Gießerei, die einem Recycling-Betrieb gleicht. Mit unserer Marke IGNIUM entwickeln wir zudem Eisengussprodukte für den B2C-Markt im Lifestyle-Bereich und gehen neue Wege. Ganz getreu unserem Motto: Eisenguss neu denken.



www.fondium.eu



BEYER[®]
M E T A L L



≤ 315 x 315 mm
≤ 520 x 260 mm
bis zu 520 mm Ø

BEYER METALL ist professioneller Hersteller für die weltweit größten Stranggussabmessungen aus Kupfergusslegierungen und Entwicklungspartner für kundenspezifische Lösungen der metallverarbeitenden Industrie bis hin zum einbaufertigen Zeichnungsteil.



**Mittelrheinische Metallgießerei
Heinrich Beyer GmbH & Co. KG**

Koblenzer Straße 69
56626 Andernach
Tel.: 02632 - 4004-0
www.mmhb.de

Aus Tradition unseren Kunden verpflichtet – Die Issselburg Guss und Bearbeitung GmbH

Issselburg Guss und Bearbeitung GmbH – Tradition trifft auf Innovation. Die Issselburger Hütte hat eine lange Geschichte in der Gießereibranche. Heute steht die Issselburg Guss und Bearbeitung GmbH für handlungsschnelle, innovative Lösungen. Unser Unternehmen setzt auf technologischen Fortschritt, um unseren Kunden hochwertige Gussteile anzubieten. Besuchen Sie uns auf der GIFA 2023 oder weiteren Fachmessen und lernen Sie uns kennen.

Erleben Sie Geschichte und Innovation vereint: Die Issselburg Guss und Bearbeitung GmbH ist ein moderner Dienstleister im Gießerei-Sektor, dessen Wurzeln bis in das Jahr 1794 zurückreichen.

Als einstiger Hersteller von Leuchtturmverkleidungen, Postsäulen und Dampfmaschinen hat sich unser Unternehmen stets den Herausforderungen des Marktes angepasst und kontinuierlich weiterentwickelt.

Heute setzen wir auf innovative Lösungen und schnelle Handlungsabläufe, um intelligente und nachhaltige Ergebnisse für unsere Kunden aus den Bereichen Anlagen-, Motoren-, Nutzfahrzeug- und Schienenfahrzeugbau zu erzielen.

Durch den Einsatz moderner Technologien und einer umfassenden Qualitätssicherung garantiert die Issselburg Guss und Bearbeitung GmbH höchste Präzision und Zuverlässigkeit bei allen Produkten. Hierbei können wir auf eine breite Palette an Gusseisenwerkstoffen zurückgreifen.

Die Bearbeitung der Gussteile erfolgt auf modernen Bearbeitungszentren und kann neben Fräs- und Drehbearbeitungen auch Schweißarbeiten, Oberflächenbehandlungen und Montagearbeiten umfassen. Die Zufriedenheit unserer Kunden steht dabei immer im Fokus.

Zusätzlich bietet die Issselburg Guss und Bearbeitung GmbH auch Dienstleistungen wie ein simulationsgestütztes Simultaneous Engineering und Prototypenbau an. Wir arbeiten eng mit unseren Kunden zusammen, um individuelle Lösungen zu entwickeln und umzusetzen.

Die jahrelange Erfahrung, zusammen mit einer starken Kundenorientierung, macht die Issselburg Guss und Bearbeitung GmbH zu einem zuverlässigen Partner für anspruchsvolle Projekte.

Kontakt

Issselburg Guss und Bearbeitung GmbH

Minervastraße 1
D-46419 Issselburg
Tel.: +49 (0)2874 39-0
sales@ihi.de
www.ihide





Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Andreas Bührig-Polaczek

Institutsleitung und
Lehrstuhl für Gießereiwesen

Autoren:

Andreas Bührig-Polaczek

Metin Kaynak

Steffen Gimmler

Maximilian Rudack

Iris Raffeis





Foto: Peter Winandy



Das Gießerei-Institut der RWTH Aachen – Partner für Forschung und Industrie

Know-how und Ausstattung des Gießerei-Institutes umfassen die für angewandte Projekte notwendige praxisrelevante Anlagentechnik, umfangreiche Analytik und Simulationsmöglichkeiten sowie die für anspruchsvolle Grundlagenuntersuchungen wichtigen Versuchseinrichtungen, Messverfahren und Modellierungsmethoden. Die zentralen Forschungsgebiete des Gießerei-Institutes liegen in den Bereichen Metallurgie, Erstarrung, Fertigungstechnik, Gusswerkstoffe, innovative und hybride Werkstoffe, Werkstoffe für die additive Fertigung, Gießverfahren, Pulverherstellung, Legierungsentwicklung, Bionik und Simulation. Adressiert werden in diesen Werkstoff- und Prozessschwerpunkten auch die aktuell sehr wichtigen Themen der Digitalisierung und die Erarbeitung von Lösungen für die zukünftige Klimaneutralität der Gießereibranche.

Technologietransfer und Kooperation mit der Industrie stehen in allen Themen gleichberechtigt neben einer ausgewiesenen Grundlagenforschung. Eine ingenieurwissenschaftliche Ausrichtung und die enge Verbindung von Theorie und Praxis ermöglichen einen kontinuierlichen Erkenntnisgewinn

und -transfer. Das Gießerei-Institut wirkt sowohl in klassischen projektorientierten Kooperationen als auch in strategischen Plattformen mit, die gemeinsam mit der Industrie auch strategische und langjährige Forschungsverbünde ermöglichen.

Gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Korrosion und Korrosionsschutz, dem Lehrstuhl für Grundlagen der Erstarrung und dem Lehrstuhl für Theorie und computergestützte Simulation von Energiematerialien bietet das Gießerei-Institut modernste Analysemethoden zur Prozess-, Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung sowie Simulation und Modellierung an. Die folgende Aufstellung zeigt einen Ausschnitt unseres Portfolios. Neu ist aktuell zusätzlich die gesamte Prozesskette der additiven Fertigung für metallische Bauteile vom Pulver bis zum fertigen Bauteil.

Gießerei

- Druckgieß-, Schwerkraft- und Vakuumgießanlagen für alle gängigen Gusswerkstoffe
- Sandguss, Kernfertigung, Gusseisenschmelzeinrichtung
- Thermische Analyse, Funkenspektrometrie
- Feinguss- und Formstofflabor, additive Fertigung
- Erstarrungs- und Gefügesimulation

Korrosion und Korrosionsschutz

- Lochfraß- und Kontaktkorrosionsmessungen
- Klimawechseltests (inkl. Tiefkühlaggregat)
- Analyse interkristalliner- und Spannungsrisskorrosion

Metallographie & Analytik

- Licht- und Rasterelektronenmikroskopie
- Digitale Bildanalyse
- Computertomographie
- Röntgendiffraktometrie

Mechanische Werkstoffprüfung

- Hydraulische und elektromechanische Zerreißmaschinen

Kontakt

Gießerei-Institut
 Institutsleitung und Lehrstuhl für Gießereiwesen
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Bührig-Polaczek
 Intzestraße 5
 D-52072 Aachen
 Tel.: +49 (0)241 80-95880
 sekretariat@gi.rwth-aachen.de
 www.gi.rwth-aachen.de

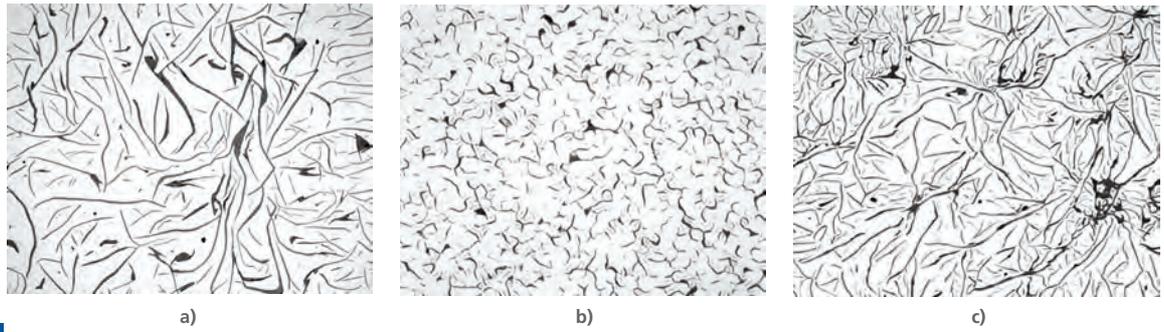


Abb. 1: Gefügebilder von Gusseisen GJL.
a) Schliffbild natürlich;
b) Digitale Zwischenstufe synthetisch;
c) finales Bild synthetisch

- Umlaufbiegeprüfung
- Optische 3D-Vermessung dynamischer Verformung

Grundlagen der Erstarrung

- Schwebeschmelzverfahren
- Sessile-Drop-Apparatur
- Virtuelles Materialdesign

Additive Fertigung

- Inertgas-Pulververdünnungsanlage mit Tiegelmodul für die Herstellung von Metallpulver
- Laser-Metall-Depositionsanlage
- pulverbettbasierte Selective Laser Melting-Anlage

Lösungen für erweiterte Anwendungen von Werkstoffen und Prozessen in der Gießereitechnik

Im Fokus aktueller Forschungsprojekte des Gießerei-Institutes der RWTH-Aachen stehen Werkstoffe und Prozesse für die Anwendungsfelder Automotive, Energie- und Medizintechnik. Wichtige Werkstoffe sind dabei Gusswerkstoffe wie Gusseisen, Aluminium-, Magnesium-, Kupfer-, Titan- und Nickelbasislegierungen sowie hybride Verbundbauteile aus verschiedenen Metall-/Metall- und Metall /Kunststoffverbunden sowie Werkstoffe für die additive Fertigung und metallische Schwämme. Steigende Anforderungen verlangen verbesserte Gusswerkstoffe, die mit modernsten Methoden, wie thermodynamische Berechnungen und innovativer Gefügeanalytik, erforscht sowie experimentell und statistisch verifiziert werden. Neben der Grundlagenforschung stehen dabei gleichberechtigt anwendungsnahe Entwicklungsarbeiten, die gemeinsam mit der Industrie durchgeführt werden.

Weiterhin erfordern hervorragende und innovative Produkte nicht nur hochwertige Werkstoffe sondern auch die entsprechenden zukunftsweisenden Gießtechnologien zu deren Herstellung. Die zunehmende Klimaneutralität der Produktion und Produkte ist dabei eine zentrale und aktuelle Herausforderung. Die Eigenschaften moderner Werkstoffe für die Anwendung in innovativen Produkten werden nicht nur z.B. durch die chemische Zusammensetzung der metallischen Legierung bestimmt, sondern es besteht auch eine sehr hohe Korrelation zum Herstellungsprozess. Daher berücksichtigt eine moderne Werkstoffentwicklung auch den Einfluss des Fertigungsprozesses auf das Gefüge und die finalen Eigenschaften, oder hat sogar diese Korrelation zum Schwerpunkt. Neben den gewünschten Gefügeeigenschaften sind auch Defekte, Gradienten und

unerwünschte Gefügemorphologien zu berücksichtigen, die in der Fertigung weitgehend vermieden werden müssen. Herausfordernde Fragestellungen der Digitalisierung wie Simulation und Modellierung, Machine Learning sowie Industrie 4.0 sind in diesen Arbeiten ebenfalls integriert.

Im Folgenden werden an einzelnen Beispielen grundlegende Arbeiten zur Mikrostruktur von Gusswerkstoffen und zur Prozessoptimierung von Gießprozessen vorgestellt und mit neuen Anwendungsmöglichkeiten und aktuellen Fragestellungen wie Industrie 4.0 verknüpft.

Gusseisen: moderner klassischer Werkstoff – mit Machine Learning (ML) Gussgefüge automatisch analysiert

Mit dem Fortschritt in der Technologie und im Zuge zunehmender Digitali-



Abb. 2: n-CT-Tomographie eines groben A-Graphit Netzwerks.

2

sierung steigen die Anforderungen an Bauteile und infolgedessen die Anforderungen an die Werkstoffe. Für die damit verbundenen geforderten verbesserten Eigenschaften eines Gusswerkstoffes ist eine zuverlässige und aussagekräftige quantitative Gefügebeschreibung des Produkts essentiell, da durch das Gefüge Informationen zu den Werkstoffeigenschaften ermittelt werden können. Die Eingrenzung der Größe und Morphologie einzelner Phasen hat hierbei eine wichtige Bedeutung. Jedoch zeigt sich, dass die Klassifizierung komplexer Gefüge, insbesondere bei Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL), Schwächen in der Allgemeingültigkeit, Objektivität und Digitalisierung aufweist.

Um dem Gießer und dem Gussabnehmer eine gemeinsame Grundlage für Absprachen in Bezug auf die Qualitätssicherung zu bieten, ist eine reproduzierbare, allgemeingültige, objektive (Hard- & Software unabhängige) und automatisierte Auswertung des Gefüges unerlässlich. Darüber hinaus trägt dies auch zur Verbesserung von Werkstoffeigenschaften bei, da das Gefüge direkte Zusammenhänge zu den entsprechenden Eigenschaften mit Hilfe von Korrelationen ermöglicht. Aus diesem Grund soll in diesem Forschungsvorhaben ein allgemeingültiger und objektiver Anordnungs-klassifikator mittels Machine Learning (ML) auf der Grundlage der Ergebnisse des Vorgängerprojekts entwickelt werden. Um dem

zu entwickelnden ML-Algorithmus genügend Bilddaten zur Verfügung stellen zu können, wird Generative Adversarial Networks (GAN) verwendet. Auf diese Weise kann eine Vielzahl an synthetischen Bildern erzeugt werden ([Abbildung 1](#)).

Der ML-Algorithmus arbeitet auf Basis eines neuronalen Netzes und erkennt und klassifiziert lamellare Graphitanordnungen selbstständig. Zusätzlich wird der Algorithmus durch den Lernprozess zunehmend unempfindlicher gegenüber Änderungen in der Bildqualität, sodass auf dieser Grundlage die visuelle Bildanalyse weitestgehend ersetzt werden kann.

Eine weitere Problemstellung stellt die zweidimensionale quantitative Gefügebeurteilung dar. GJL ist aufgrund seiner Graphitstruktur ein Werkstoff, der ein im Dreidimensionalen stark verzweigtes Gefügenetzwerk hat. Obwohl dieses Wissen bekannt ist, beschränkt sich die Gefügeuntersuchung bei GJL aus Kosten- und Zeitgründen auf das Zweidimensionale. Allerdings kann ein einzelner zweidimensionaler Schnitt im Gefüge nicht das tatsächliche dreidimensionale Netzwerk beschreiben. Aus diesem Grund wird in diesem Forschungsvorhaben auch eine quantitative dreidimensionale Gefügeuntersuchung durchgeführt. Da hier das Potential und das Maß an möglichen Informationen, die aus dem 3D-Gefüge erarbeitet werden können, sehr hoch

ist, soll in diesem Projekt eine umfangreiche statistische Untersuchung mittels Korrelationen und multiplen linearen Regressionsgleichungen zwischen 2D- und 3D-Parametern erfolgen, um 3D-Parameter (z.B. Volumenanteil, Oberfläche und spezifische Oberfläche) vollständig durch 2D-Parameter (z.B. Graphitflächenanteil, Lamellenlänge) beschreiben und substituieren zu können. Dadurch ergeben sich erweiterte Nutzungsmöglichkeiten der 2D-Analyse des Gefüges bei nahezu gleichbleibendem Aufwand und Kosten.

Neue Potentiale für die Gussqualität – Optimierung des Porositätsprofils in Al-Si-Gusslegierungen

Poren in Gussteilen reduzieren in Abhängigkeit ihrer Ausprägung, Position und Größenverteilung die lokalen statischen und zyklischen mechanischen Eigenschaften. Insbesondere kantige und zerklüftete Schwindungsporen bzw. Schwindungsporencluster führen zu lokalen Spannungserhöhungen und bei zyklischer Bauteilbeanspruchung zur Rissinitiierung, wodurch sich die Ermüdungsfestigkeit signifikant verringert. Im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojektes gemeinsam mit der Industrie sollen die Keimbildungsbedingungen von Wasserstoffporen erforscht und anschließend gezielt instrumentalisiert werden, um zerklüftete Schwindungsporesporosität durch homogen und feinverteilte runde Wasserstoffporosität zu ersetzen und damit die Ermüdungsfestigkeit zu steigern.

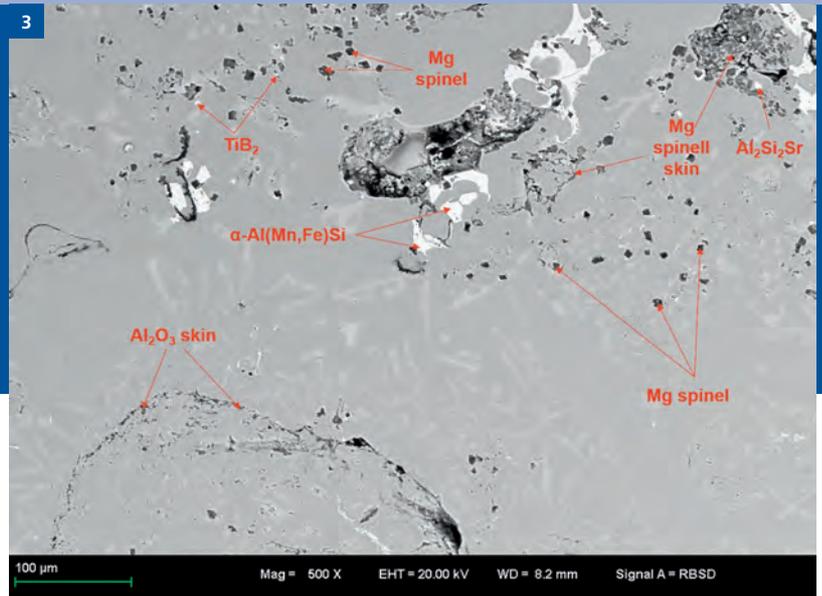
Abb. 3: Mittels EDX identifizierte Einschlüsse in einer untersuchten PoDFA-Probe.

Hierzu werden die Legierungsschmelzen AlSi11Mg und AlSi7Mg0,3 bei Variation der zentralen Einflussgrößen – Erstarrungsgeschwindigkeit, Wasserstoffgehalt und Keimhaushalt – auf die sich einstellenden Porositätsprofile untersucht.

Um die Beladung der Schmelze mit Keimen, welche die Ausbildung von Wasserstoffporen fördern genauer zu untersuchen wurden PoDFA Proben gegossen und metallographisch untersucht. Mittels Rasterelektronenmikroskop und einem an diesem integrierten EDX-Detektor konnten unterschiedliche Klassen an Einschlüssen identifiziert werden, welche als Keimstellen für die Porenbildung fungieren können. Ein Überblick hierzu ist folgend in **Abbildung 3** gegeben.

Eine genauere Untersuchung der für Schwingfestigkeitsprüfungen hergestellten Zylinderproben lässt einen starken Einfluss dieser Einschlüsse auf die Bildung von Gasporen in den Gefügen erkennen. Um den Keimbildungsmechanismus besser beschreiben zu können wurden in gezielt ausgesuchten Probenkörpern für alle Poren in definierten Bildausschnitten angrenzende Keimstellen und Fremdpartikel untersucht, **Abbildung 4**.

Abb. 4: Untersuchung der chemischen Zusammensetzung von porenbildend wirkenden Partikeln.

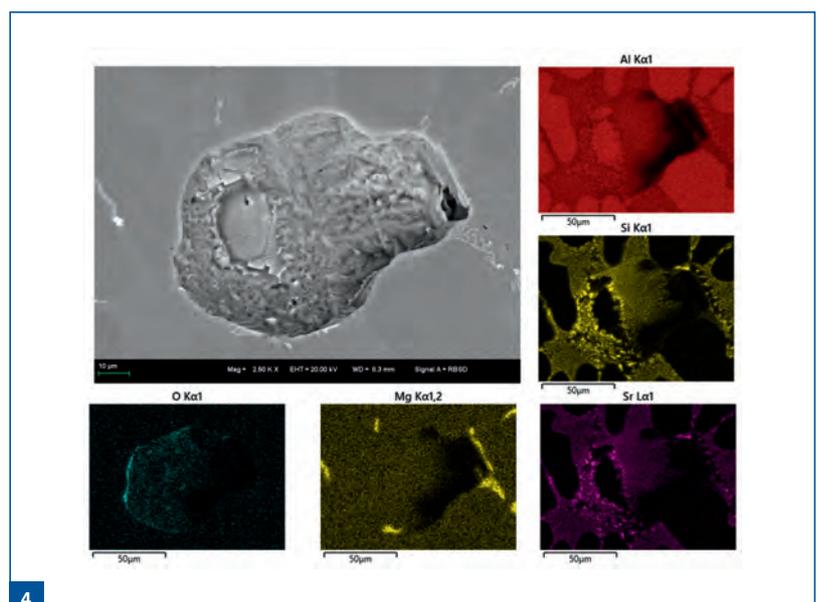


Anhand der ausgewerteten chemischen Zusammensetzungen kann eine Wahrscheinlichkeitsverteilung erstellt werden, welche angibt, welche Partikel tendenziell für die Bildung und Ausprägung von Gasporen verantwortlich sind. Die Ergebnislage nach diesem Auswerteschema ist folgend exemplarisch für eine mit 1,5 g/kg Keimbildner versetzte AlSi11Mg Legierung dargestellt, **Tabelle 1**. Über die dargestellte Klassifikation kann die Wirkung einzelner Einschlussarten als möglicher Keimbildner für Gasporen eingestuft werden. Das angewandte Schema soll in

einem nächsten Schritt zudem an industriellen Realbauteilen validiert werden.

Druckguss – mit Industrie 4.0 innovativ weiterentwickelt

Die Druckgießzelle der Frech DAK450-40 des Gießerei-Institutes verfügt über 7 OPC UA Server, die Daten von unterschiedlichen Zellkomponenten bereitstellen können. Die Messwerte der Druckgießmaschine, des Ofen- und Dosiersystems, des Sprühroboters sowie zusätzlicher Sensoren und des Spritzgießaggregates können somit zusammengeführt



5

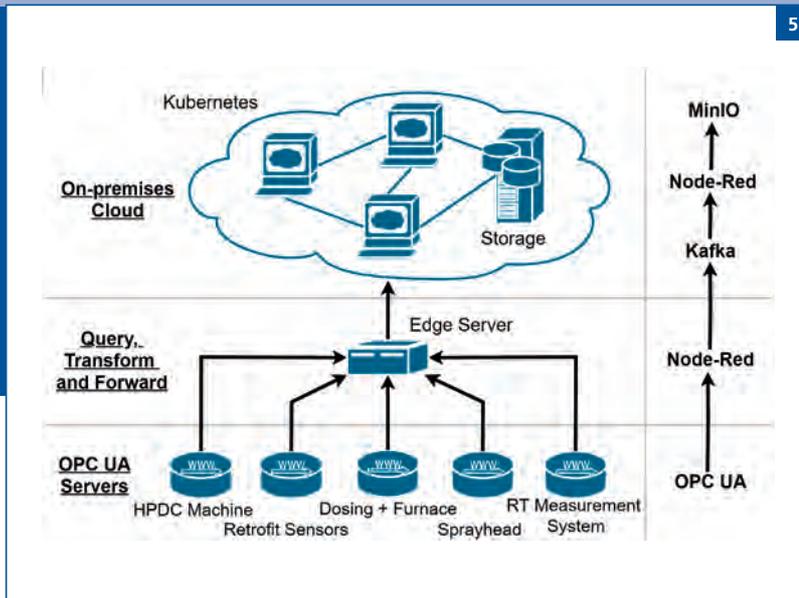


Abb. 5: Die am Gießerei-Institut im Rahmen des Internets der Produktion implementierte Datenpipeline und Infrastruktur zur Datenextraktion der Frech DAK450-40 Druckgießzelle.

und in einer cloudbasierten Infrastruktur bereitgestellt werden. Hierzu werden die Daten zuerst auf einem leistungsfähigen x86 basiertem Edge Server mit 12 Rechenkernen physisch nahe der Zelle verarbeitet und mit geringer Latenz an ein Kubernetes basierten Cluster am Rechenzentrum der RWTH Aachen versendet. Apache Kafka wird hierbei als Messagebroker verwendet und die Daten werden anschließend in einem Object Store gespeichert. Die Daten sind somit direkt global über das Internet zum Abruf verfügbar. Die am Gießerei-Institut eingesetzte Infrastruktur ist in [Abbildung 5](#) dargestellt. Die Nutzung von etablierten Big Data Frameworks wie Apache Kafka in Kombination mit nutzerfreundlicher browserbasierter grafischen Programmierertools wie Node-Red ermöglicht hierbei kurzfristige Anpassungen und Erweiterungen hinsichtlich der Implementierung zusätzlicher Datenquellen oder der Vorverarbeitung von Daten.

Aktuell wird daran gearbeitet die Daten auf der Edge und in der Cloud effizient vorzuverarbeiten, um den unterschiedlichen Frequenzen und Formaten der Informationen gerecht zu werden sowie eine schnelle Aufbereitung für den Anwender zuzulassen. Hierzu wird getestet den Object

Store durch eine Zeitreihendatenbank sowie eine relationale Datenbank zu ergänzen, um dem Datennutzer den bestmöglichen Zugriff zur folgenden Datenanalyse zu gewährleisten.

Additive Fertigung – ein attraktives Forschungsstandbeim im neuen Standort Campus Melaten

Für die Herstellung von Metallpulverlegierungen steht dem Gießerei-Institut im Research Center for Digital Photonic Production (RCDPP) eine hybride Inertgas-Pulververdüngungsanlage mit Tiegel- und Elektrodenmodul zur Verfügung. Die additive Weiterverarbeitung und Bauteilherstellung erfolgt, je nach Pulvermaterialeigenschaften und Anforderung des Anwendungsfalls, entweder mit einer Laser-Material-Depositionsanlage (LMD-Anlage) oder einer pulverbettbasierten Laser Powder Bed Fusion – (LPBF)-Anlage.

Beide Anlagen sind mit einer Heizplatte, bzw. Vorheizung ausgestattet, so dass durch die Veränderung von Abkühlbedingungen Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften genommen werden kann. So können erfolgreich die unterschiedlichsten Werkstoffe verarbeitet und untersucht werden, was zu umfassenden Erfahrungen im Bereich der Werkstoffe im Bereich der additiven Fertigung führt.

Beispielsweise kann der Einsatz einer Heizplatte eine Verminderung des unerwünschten Restaustenitgehalts (RA) im martensitischen Warmarbeitsstahl 1.2343 von ursprünglich 18 % auf ~0.3% im sog. „as-built“-Zustand bewirken, ([Abbildung 6a](#)). Ebenfalls kann durch die Beeinflussung der thermischen Vorgänge gezielt Risse vermieden (bes. bei Nickellegierungen) und das Ausscheidungsverhalten spezieller

Tabelle 1: Anteil der in Gaspartikeln identifizierten Partikel.

	Anzahl (-)	Prozentualer Anteil (%)
Keimbildner, Intermetallische Phasen (TiB ₂ , Al ₂ Si ₂ Sr, AlFeSi,...)	86	49,4
Spinell-Haut	24	13,8
kleine Al ₂ O ₃ Haut	13	7,5
grobe Al ₂ O ₃ Haut	45	25,9
Al ₂ O ₃ Partikel	1	0,6
Karbide und C-Phasen	5	2,9



Abb. 6: a) 1.2343 as-built, tempered at 550 °C, 4 h Martensit, Restaustenit (RA)~0.3 % (Doi.org/10.3390/jmmp6030063), b) T1-Ausscheidungen in der AlCu-Li-Legierung AA2099 (DOI:10.3390/ma13225188), c) AlSi10Mg-Geometrien

Aluminiumknetlegierungen (Abbildung 6b) gesteuert werden. Abbildung 6c zeigt Gitterstrukturen der Aluminiumgusslegierung AlSi10Mg. Weitere Methoden zur Beeinflussung der Mikrostruktur und damit den mechanischen Eigenschaften ist die Anwendung unterschiedlicher Scansstrategien (Abbildung 7), um beispielsweise die Dehnung bei Duplexstählen zu maximieren.

Thermische Simulationsprogramme (Abbildung 8) helfen bei der Erstellung von Temperaturprofilen und geben Aufschluss auf Abkühlraten. Mit dieser Kenntnis können thermodynamische Simulationen (Gleichgewicht und Nicht-Gleichgewicht) bei der Entwicklung oder Modifizierung der chemischen Zusammensetzung spezieller Legierungen für die additive Fertigung zielgenauer eingesetzt werden.

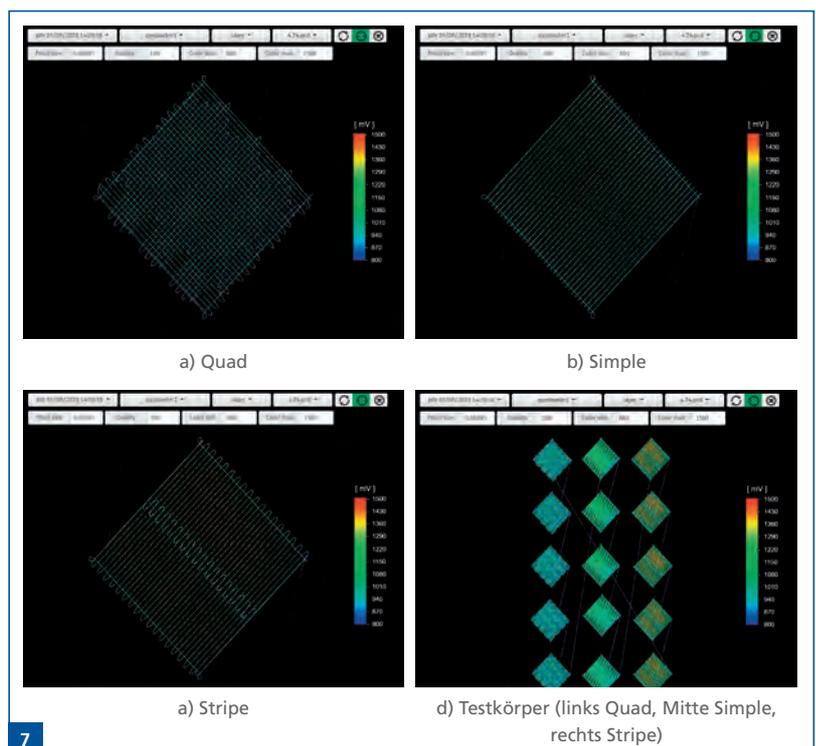
Abb. 7: a) bis c) Pyrometermessungen für eine Lage der sog. Schraffurmuster Quad, Simple und Stripe und korrespondierende Testkörper.

Unsere Ausbildung: modern, zukunftsicher, innovativ

Der Lehrstuhl für Gießereiwesen vertritt die unterschiedlichen Wissenschaftsgebiete der Gießereitechnik in der Lehre. Die Grundlagen der Gießereitechnik werden in verschiedenen Bachelor- und Masterstudiengängen als Pflicht- oder Wahlfach angeboten. Die speziellen Vertiefungen des Lehrstuhls erfolgt im Bachelor-/ Masterprogramm „Werkstoffingenieurwesen“ bzw. „Wirtschaftsingenieurwesen Fachrichtung Prozess- und Werkstofftechnik“. Für englischsprachige Studierende wird zudem der Masterstudiengang „Materials Engineering“

angeboten, der inzwischen mit der Anzahl der Studierenden den deutschsprachigen Studiengang überholt hat. Der Bachelor ist ein berufsqualifizierendes Studium mit einer Regelstudienzeit von sechs Semestern. Aufbauend auf den Bachelor können Studierende im Rahmen des viersemestrigen Masterstudiengangs ihre wissenschaftlichen Kenntnisse vertiefen. Der Master bietet ihnen dabei die Möglichkeit, zwischen einem inhaltlich breit gefächerten und einem hoch spezialisierten Studium zu wählen.

Ein Highlight in der Ausbildung sind die jährlich stattfindenden Exkursio-



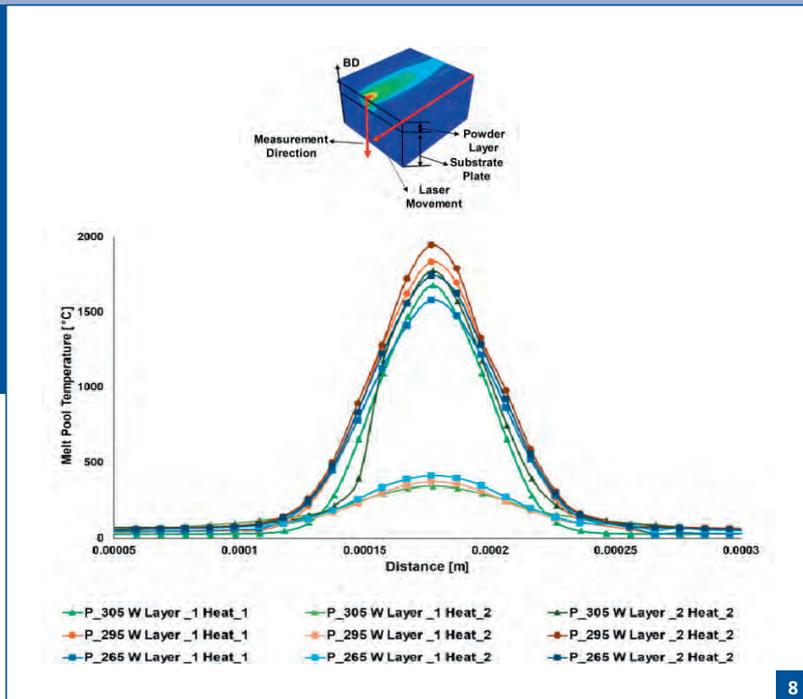


Abb. 8: Goldak Ellipsoid Simulationen von Temperaturprofilen im Schmelzpool.

Process. 2022, 6, 63. <https://doi.org/10.3390/jmmp6030063>

- [2] Raffeis I, Adjei-Kyeremeh F, Vroomen U, Richter S, Bührig-Polaczek A. 'Characterising the Microstructure of an Additively Built Al-Cu-Li Alloy'. Materials (Basel). 2020 Nov 17;13(22):5188. doi: 10.3390/ma13225188. PMID: 33212906; PMCID: PMC7698369.

8

nen, die im Wechsel in Deutschland und innerhalb oder außerhalb von Europa stattfinden. Internationale Highlights waren die Exkursionen 2014 nach China und 2016 in die USA sowie 2019 nach Japan, **Abbildung 9**. Für 2023 ist eine Exkursion in die Türkei geplant. Für die Studierenden ist es wichtig, einerseits sowohl die nationale Stärke der deutschen Gießereibranche zu erleben, andererseits aber auch die globale Verflechtung unserer Branche.

Weiterhin lernen sie dadurch das jeweilige Land, die lokale Lebens- und

Arbeitsweise sowie verschiedene Unternehmenskulturen kennen. Unterstützt werden diese Exkursionen durch zahlreiche nationale und internationale Firmen der Gießereibranche.

Literatur.

- [1] Raffeis, I.; Adjei-Kyeremeh, F.; Ewald, S.; Schleifenbaum, J.H.; Bührig-Polaczek, A. 'A Combination of Alloy Modification and Heat Treatment Strategies toward Enhancing the Properties of LPBF Processed Hot Working Tool Steels (HWTS)'. J. Manuf. Mater.



Abb. 9: Teilnehmer der Pfingstexkursion 2019 beim Besuch der Kimura Gießerei, Shizuoka, Japan.

9

RUDOLF UHLEN GmbH

Arbeitsschutzartikel für Gießereien

Am Höfgen 13 - 42781 Haan
www.aschua-uhlen.de

Tel.: 02129-1444
info@aschua-uhlen.de



Die Rudolf Uhlen GmbH ist ein Hersteller von Persönlicher Schutzausrüstung (PSA). Besonders für Gießereien und die Stahlindustrie bieten wir spezielle Lösungen im Bereich des Hitzeschutzes an, zum Beispiel:

- Helmhalterungen
- Bochumer Brillen
- Drahtschirme
- PC-Schutzscheiben
- Goldbedampfte Scheiben
- Klappbrillen am Helm

Besuchen Sie uns
auf der GIFA 2023
in Düsseldorf!
Halle 10 - C18



Ihr qualifizierter Partner für Ofensicherheit und Feuerfestüberwachung

SAVEWAY®

- ✓ weltweit einzigartige, kontinuierliche Restwandstärkemessung des Feuerfestmaterials während des Ofenbetriebes

SAVEDRY®

- ✓ Kontinuierliche Überwachung auf Kühlwassereintritt, Trocknungsmessung an feuerfesten Zustellungen

SAVELINE®

- ✓ Flächendeckende Hot-Spot-Messung

OPTISAVE

- ✓ Temperaurmessung zur Überwachung großer Flächen oder ausgewählter Bereiche

Unsere Systeme erhöhen die Betriebssicherheit und vermeiden Produktionsausfälle sowie Anlagenschäden. Sprechen Sie uns an!



über 1.300
Anwendungen
weltweit

www.saveway-germany.de



Ressourcenschonend – Umweltfreundlich – Wirtschaftlich

Die KLEIN Anlagenbau AG ist der erfahrene und kompetente Partner auf dem Gebiet der pneumatischen Förderung, Kernsand-aufbereitung, Altsand-Rückgewinnung und Gießereiausrüstung. Zum Leistungsspektrum gehören Entwicklung, Beratung, Projektierung, Engineering, Fertigung, Montage, Inbetriebnahme, Schulung und After-Sales-Services. Den wachsenden Ansprüchen der Märkte entsprechend entwickelt KLEIN ressourcen- und umweltschonende Verfahren und Anlagen, die gleichzeitig wirtschaftlich sind.

Der pneumatische Förderer SP-HL wurde speziell für den schonenden und energiesparenden Transport von Gießereisanden entwickelt. Durch den quasikontinuierlichen Förderprozess wird eine **Energieeinsparung** von bis zu **50 %** im Vergleich zu herkömmlichen Förderern erzielt; Rohrleitungsverschleiß wird minimiert und die Quarzkornstruktur bleibt

erhalten. Dank des Doppelkammer-Mischprinzips des **Kernsandmischers STATORMIX** wird im Vergleich zu herkömmlichen Kernsandmischern eine **außerordentliche Mischqualität in sehr kurzen Mischzeiten** bei niedrigem **Energieeintrag** in die Kernsandmischung erzielt.

Beim **Regenerierverfahren CLUSTREG®** wird der anorganisch gebundene Altsand ohne die kostenintensive thermische Stufe wiederaufbereitet. Die endliche Ressource Sand wird geschont, umweltbelastende Transporte entfallen und der Altsand wird besonders **energiesparend regeneriert**. Für die **Reinigung von Gussteilen** bietet KLEIN das Stoßwellenverfahren **CERABITE®** an, mit welchem Sand- und Keramikkerne, Schichten und Späne aus komplexen Gussteilen wie Motorblöcken und Zylinderköpfen entfernt werden. So können bis zu **140 Gussteile pro Stunde** bei einem Energiebedarf von **nur 6 kW** gereinigt werden.

KLEIN steht für Umweltschutz und Energieeffizienz: Das Firmengebäude entspricht dem KfW55-Standard und zeichnet sich durch seine hohe Energieeffizienz aus. Seit 2022 führt das Unternehmen das Siegel ÖKOPROFIT, welches für gezielte Maßnahmen in Sachen Klimaschutz, Ressourcenmanagement, Nachhaltigkeit und CO₂-Footprint steht. Im Frühjahr 2023 folgt die Zertifizierung des Managementstandards DIN ISO 14001 für Umwelt. Auf der GIFA 2023 stellen die KLEIN Anlagenbau AG und die KLEIN Stoßwellentechnik GmbH gemeinsam aus (Halle 16, Stand C11).

Kontakt

KLEIN Anlagenbau AG
KLEIN Stoßwellentechnik GmbH
 Obere Hommeswiese 53-57
 D-57258 Freudenberg
 Tel.: +49 (0)2734 501301
 info@klein-group.eu
www.klein-ag.de



Kernsandmischtechnik

für organische und anorganische Verfahren, schlüsselfertige Anlagen mit Sand-, Binder- und Additivdosierung und Kernsandverteilung

Regeneriertechnik

Anlagen für Kaltharzsand- und Kernsand-Rückgewinnung,

CLUSTREG®
 für anorganisch gebundene Kernsande

Pneumatische Fördertechnik

für trockene, rieselfähige, abrasive und abriebempfindliche Stoffe

Stoßwellentechnik

CERABITE®
Saubere Gussteile

für sichere Restsand- und Schlichteentfernung bei anspruchsvollen Gussteilen



KLEIN Anlagenbau AG
 KLEIN Stoßwellentechnik GmbH
 a subsidiary of KLEIN Anlagenbau AG





Prof. Dr.-Ing. Lothar Kallien

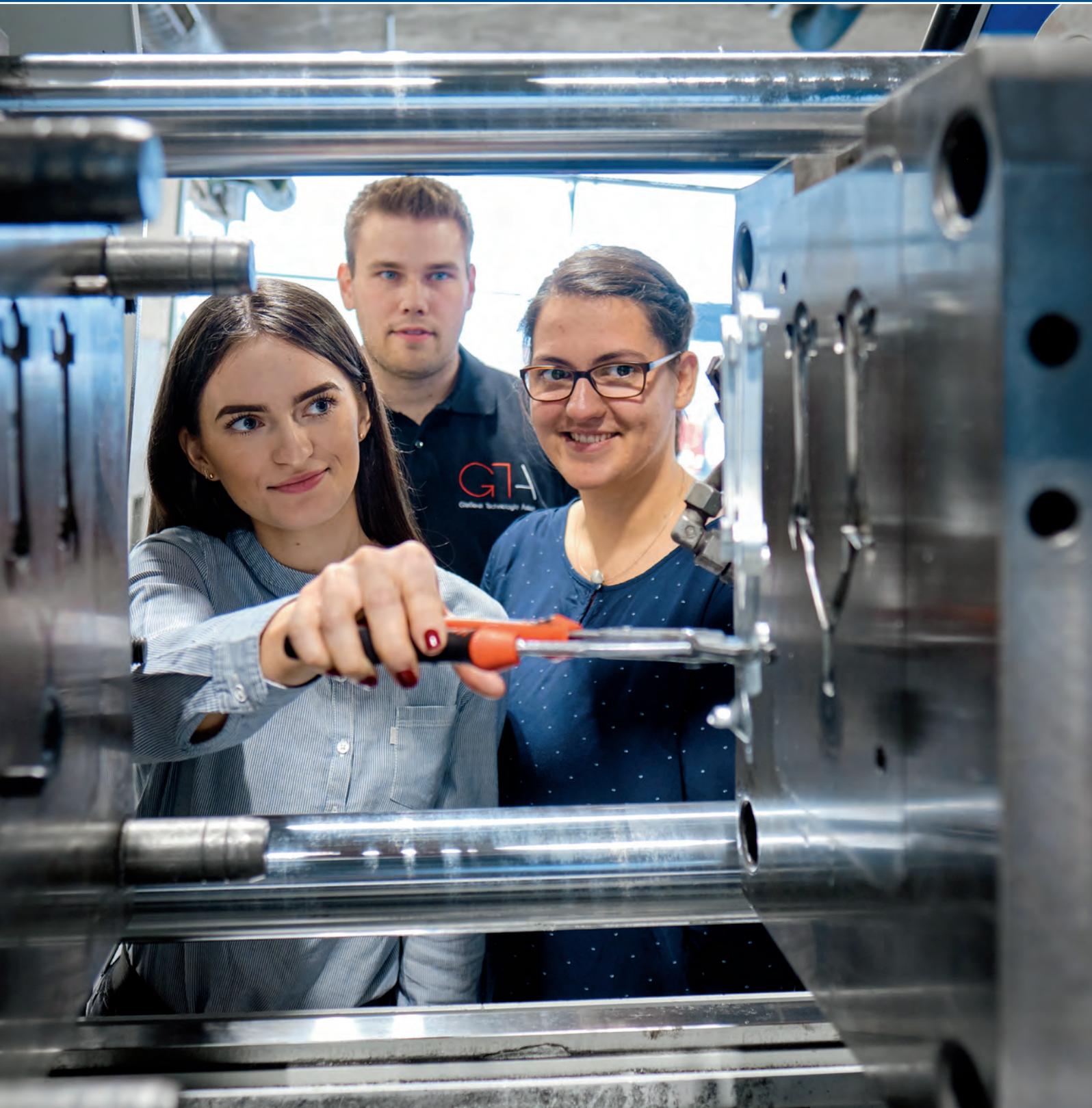
Hochschule Aalen
Fakultät für Maschinenbau und
Werkstofftechnik

Ansprechpartner Gießereitechnik

Prof. Dr.-Ing. Lothar Kallien
Tel.: +49 (0)7361 576-2252

Frau Nadine Schmid

Tel.: +49 (0)7361 576-2543
Fax: +49 (0)7361 576-2270





 Hochschule Aalen

Hochschule Aalen: Innovationen in Druckguss



Die Forschungs- und Transferaktivitäten an der Hochschule Aalen haben sich 2022/2023 auf hohem Niveau weiterentwickelt. Die Positionierung unter den führenden Hochschulen für angewandte Wissenschaften (HAW) Deutschlands im Bereich anwendungsorientierter Forschung wurde gefestigt und trägt wesentlich zur Sichtbarkeit, Wertschätzung und Attraktivität der Hochschule bei. So belegt die Hochschule Aalen im aktuellen Förderatlas der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) bundesweit unter allen HAW in der Kategorie „Direkte Projektförderung des Bundes“ Platz 1 sowie in der Kategorie „DFG-Mittel“ Platz 2. Die Spitzenposition unter den baden-württembergischen HAW auf Basis Drittmittel und Publikationsleistung pro Professor:in konnte erfolgreich zum sechzehnten Mal in Folge verteidigt werden.

Im letzten Jahr standen für 160 Projekte über 11 Mio. Euro Drittmittel ebenso zur Verfügung wie weitere 4,3 Mio. Euro aus Sonder- und Geräteprogrammen. Die Publikationsaktivität erreichte mit insgesamt 300 Publikationen einen neuen Höchststand. In der Forschung waren 132 Mitarbeitende, darunter rund 80 mit Promotionsabsicht, über Drittmittel angestellt.

Ein wesentlicher Erfolgsfaktor der Hochschule Aalen ist die für den HAW-Bereich in Deutschland wohl einmalige Forschungsinfrastruktur. So konnte die Ersteinrichtung der 30 neuen Labore in den beiden Forschungsneubauten Zentrum innovativer Materialien und Technologien für effiziente elektrische Energiewandler-Maschinen (ZIMATE) sowie Zentrum Technik für Nachhaltigkeit (ZTN) kürzlich abgeschlossen werden. Der hochmoderne Gesamtfahrzeugprüfstand VAPS am ZIMATE konnte Anfang 2022 in Betrieb genommen werden und soll zukünftig wertvolle Beiträge zur Umsetzung der Elektromobilität leisten. Ein neues Röntgenmikroskop XRM zur zerstörungsfreien Analyse von Material- und Bauteileigenschaften im Sub-Mikrometerbereich für das ZTN wurde über das Programm REACT-EU eingeworben.

Die Hochschule Aalen versteht sich als maßgeblicher Innovationstreiber und Impulsgeber für die Region und darüber hinaus. Zahlreiche Unternehmen führen Forschungsprojekte mit der Hochschule durch und erhalten hierbei eigene Fördermittel zur Durchführung von FuE-Aktivitäten. So wurden 2021/2022 knapp 50 gemeinsame Projekte im Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand ZIM durchgeführt

sowie rund 10 Projekte im Programm Invest BW Innovation II eingeworben.

Neue Strukturen zur Unterstützung des wissenschaftlichen Nachwuchses wie die durch die Bund-Länder-Initiative FH-Personal geförderte Research Academy mit Promotionskolleg und Schreibwerkstatt wurden an der Hochschule etabliert. Die Research Academy komplementiert und unterstützt die Aktivitäten des neugeschaffenen HAW-Promotionsverbands in Baden-Württemberg, in dem 24 Professor:innen der Hochschule aktuell vertreten sind und Promovierende eigenständig zur Promotion führen können.

Kontakt

Hochschule Aalen – Technik und Wirtschaft
 Gießerei Technologie Aalen – GTA
 Prof. Dr.-Ing. Lothar Kallien
 Beethovenstraße 1
 D-73430 Aalen
 Tel.: +49 (0)7361 576-2252
 gta@hs-aalen.de
 www.hs-aalen.de/gta



Gießerei Technologie Aalen



Abb. 1: Fixiertes Holzeinlege- und Druckgießform.

Abb. 2: Probe H2 mit Aluminium und Probe HM2 mit Magnesium. (Holzeinlege- und Serie V2).

Druckumgießen von holzbasierten Materialsystemen im Aluminium- und Magnesiumdruckgießverfahren

Der Einsatz nachwachsender Rohstoffe ist ein vielversprechender Ansatz bei der Reduktion von CO₂-Emissionen. In diesem Zusammenhang bietet der Werkstoff Holz ein sehr hohes Potential, da er zum einen ein Naturwerkstoff ist, der während des Wachstums CO₂ bindet und zum anderen hervorragende spezifische Eigenschaften aufweist die mit typischen technischen Werkstoffen wie Aluminium vergleichbar sind [1, 2]. Zunehmend gibt es auch Bestrebungen Holz nicht nur in den bereits etablierten Branchen einzusetzen, sondern auch in neue Anwendungen zu überführen [3]. Hierzu zählt beispielsweise der Einsatz von Holz in Fahrzeugstrukturen für Schienen- und Straßenfahrzeuge der am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt erforscht wird und die entsprechenden Fertigungstechnologien.

Eine zentrale Herausforderung stellt dabei die Integration innovativer Holzstrukturen in bereits bestehende

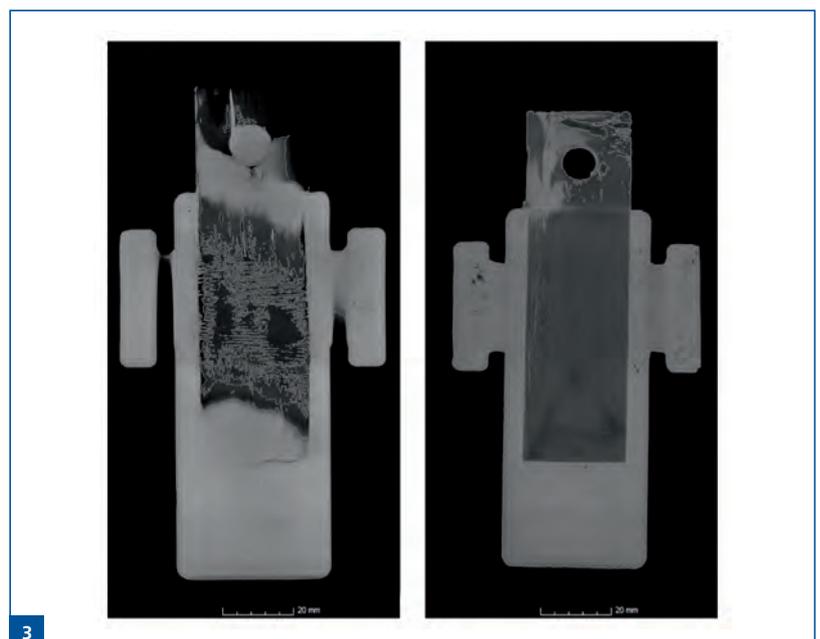
Abb. 3: Computertomographieaufnahme der Probe H2-Aluminium (links) und HM2-Magnesium (rechts)

Fahrzeugstrukturen dar. Hierfür wurde gemeinsam mit dem Institut für Leichtbau der DLR in Stuttgart erste Voruntersuchungen durchgeführt inwieweit innovative furnierbasierte Holz und Holz-Metall-Hybridwerkstoffe im Kaltammerdruckgussverfahren umgossen und hybridisiert werden können. Untersucht wurde die thermische Beeinflussung der Holzeinlege- und Metallteile beim Umgießen mit Aluminium- und Magnesium. Bereits durchgeführt wurden Computertomographieaufnahmen, um eventuell auftretende Porosität im Druckgussbauteil zu detektieren.

Das Umgießen der Holzeinlege- und Metallteile erfolgte in einem bestehenden Druckgießwerkzeug. Das Holzeinlege- und Metallteil

wurde mit einer Wandstärke von 2 mm mit Aluminium- und Magnesiumdruckgusslegierungen umgossen, [Abb. 1](#).

Beide Versuchsserien mit Aluminium- und Magnesium zeigen auf der Bauteiloberfläche eine thermische Beeinflussung der Holzeinlege- und Metallteile. [Abb. 2](#) zeigt exemplarisch die Proben H2 (Aluminiumlegierung AlSi10Mg(Fe)) und HM2 (Magnesiumlegierung AM50HP). Bei beiden Probekörpern wurde die identische Materialkombination des Holzeinlege- und Metallteils umgossen. Bei Proben mit Aluminium sind die Beeinflussungen der Holzoberfläche gegenüber Magnesiumproben deutlicher zu erkennen. Dies ist auf die geringere



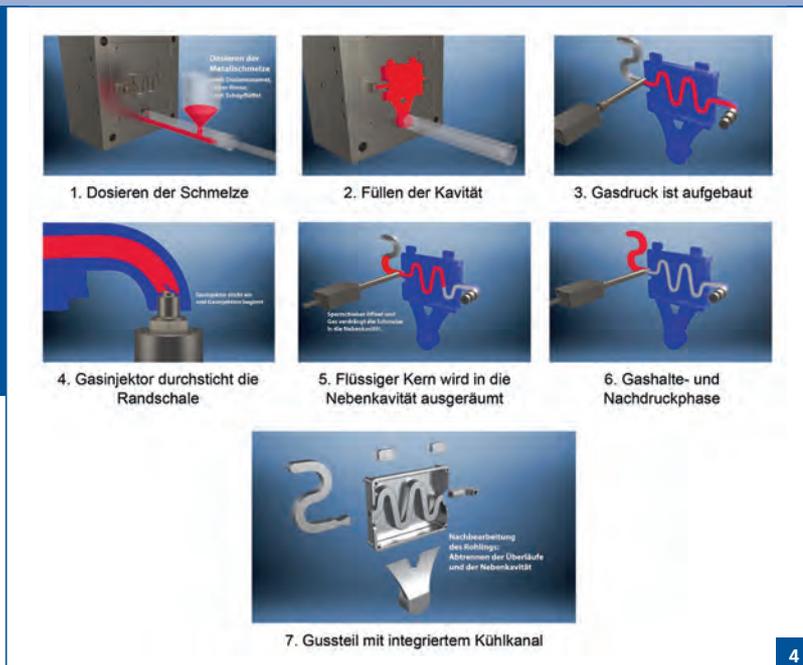


Abb. 4: Schematische Darstellung zum Ablauf des Gasinjektionsprozesses im Druckgießverfahren

tionstechnologie im Druckguss neue Freiheitsgrade bezüglich des Produktdesigns ermöglicht. Komplexe Geometrien bei Hohlbauteilen sind realisierbar, ohne dass Zusatzprozesse wie das Einlegen von Rohren oder verlorebenen Kernen erforderlich sind. Dabei wird eine Bauteilkostensenkung durch Materialeinsparung sowie durch den Wegfall vor- und nachgelagerter Prozesse erreicht.

Im Gießereilabor der Hochschule Aalen wurde bereits die Herstellung unterschiedlicher Prinzipgeometrien und Demonstratorbauteile durch die Anwendung der Gasinjektions-

Abb. 5: Einteiliges Elektromotorgehäuse mit integriertem Kühlkanal im Druckgießverfahren durch Gasinjektionstechnologie (GIT) hergestellt (links), Röntgenansicht des einteiligen Elektromotorgehäuses mit einer Kühlkanallänge von 235 cm (rechts), (Bildnachweise: Hochschule Aalen mit freundlicher Freigabe der Nematik Europe GmbH)

Wärmeenthalpie der Magnesiumlegierung AM50HP gegenüber der Aluminiumlegierung AlSi10Mg(Fe) zurückzuführen.

3D-Computertomographieaufnahmen verdeutlichen die Porosität im Inneren der Hybridproben. Exemplarisch sind in Abb. 3 Probe H2 (Aluminiumprobe) und Probe HM2 (Magnesiumprobe) abgebildet. Beide Proben zeigen einen vergleichsweise identischen und geringen Porositätsanteil im Randbereich des Holzeinlegeteils.

Bei den Vorversuchen mit holzbasierten Einlegeteilen zeigt sich, dass das Umgießen einer Holzstruktur im Druckgießverfahren grundsätzlich möglich ist. Aufgrund der im Vergleich zu alternativen Gießverfahren niedrigeren Wandstärken sowie Kontaktzeiten, welche im Druckgießverfahren vorliegen, können die thermischen Beeinflussungen der Holzeinlegeteile vergleichsweise geringgehalten werden.

Herstellung einteiliger Elektromotorgehäuse mit integriertem Kühlkanal durch Gasinjektionstechnologie (GIT) im Druckguss

Durch die Gasinjektionstechnologie im Druckguss ist die Herstellung komplexer Hohlstrukturen im Gussteil

unmittelbar im Gießprozess realisierbar. Mehrteilige Baugruppen lassen sich durch ein Druckgussbauteil mit integriertem Hohlkanal substituieren.

Während der Erstarrung des Gussteils im Druckgießwerkzeug wird Stickstoff prozesssicher über einen Gasinjektor in das Gussteil eingeleitet. Dabei wird die Restschmelze in eine sich öffnende Nebenkavität verdrängt. Dadurch wird ein definierter Hohlkanal im Gussteil erzeugt (Abb. 4). Nach dem Ausformen des Gussteils lässt sich das in die Nebenkavität verdrängte Gießmetall wirtschaftlich entfernen.

Folglich werden durch die erfolgreiche Anwendung der Gasinjek-

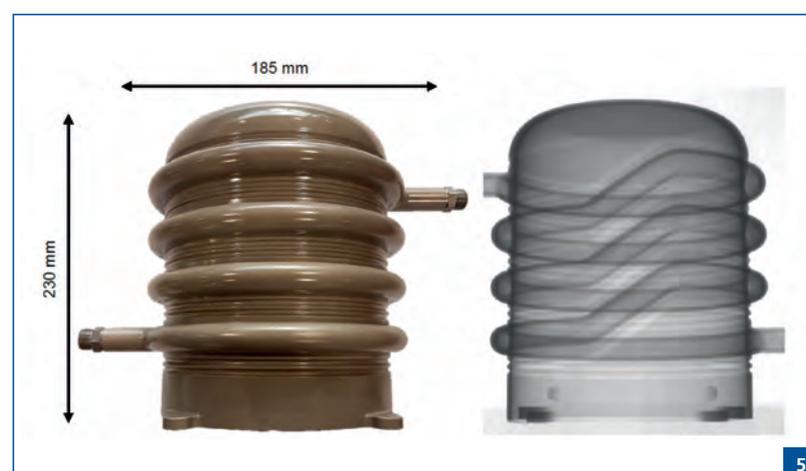
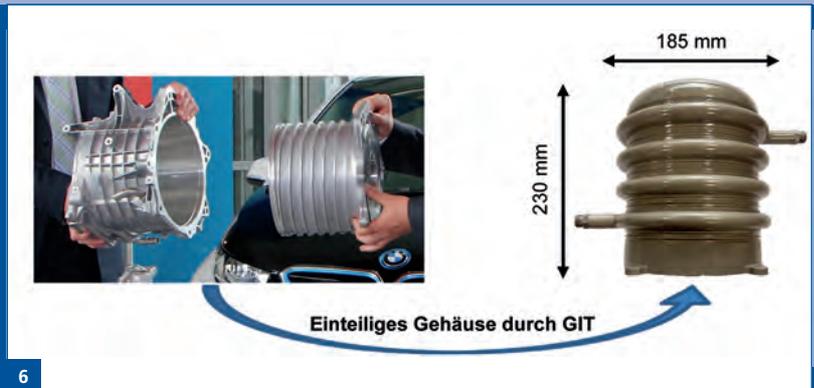


Abb. 6: Einteiliges Elektromotorgehäuse mit integriertem Kühlkanal im Druckgießverfahren durch Gasinjektionstechnologie (GIT). (Bildnachweise: Hochschule Aalen mit freundlicher Freigabe der Nemak Europe GmbH)



6

technologie im Druckguss erfolgreich nachgewiesen. Durch die Entwicklung einer industrietauglichen und prozesssicheren Gasinjektionsanlagentechnik im Rahmen eines öffentlich geförderten Projektes (Förderkennzeichen: AiF ZF4113803 K06 (ZIM)) wurde ein weiterer Meilenstein zur Übertragung dieser Technologie vom Labormaßstab auf das industrielle Produktionsumfeld erreicht.

Die Realisierung des Kühlkanals in konventionellen Elektromotorgehäusen wird meist durch eine zweiteilige Konstruktion des Gehäuses erreicht. Dadurch sind Zusatzprozesse wie eine aufwändige mechanische Bearbeitung, Verschweißen und Abdichten

erforderlich. Die Gasinjektionstechnologie im Druckguss ermöglicht hingegen die Herstellung des Kühlkanals unmittelbar im Gießprozess ohne aufwändige Zusatzprozesse. In einem gemeinsamen Industrieprojekt mit der Nemak Europe GmbH wurde die Integration des Kühlkanals durch die GIT in ein einteiliges Elektromotorgehäuse im Aluminiumdruckguss erfolgreich nachgewiesen. Durch die Gasinjektionstechnologie lassen sich glatte Kanaloberflächen und gleichmäßige Wandstärken über die gesamte Kanal-länge von 235 cm erzeugen (Abb. 5, 6).

Im März 2020 erhielt das Forscherteam des Gießereilabors der Hochschule Aalen, unter der Leitung von Prof. Dr. Lothar Kallien, gemeinsam mit drei weiteren Projektpartnern die Zusage zur Förderung des Fast Track to Innovation (FTI) Projektvorhabens MAGIT (H2020-EIC-FTI-2018-2020 Grant Agreement Number: 950866)

durch die Europäische Union. Das Projektkonsortium vereint neben der langjährigen Forschungserfahrung der Hochschule Aalen sowie der TiK – Technologie in Kunststoff GmbH im Bereich der Gasinjektionstechnologie im Druckguss die Kompetenzen aus dem innovativen Seriendruckguss der Aluweg AG (Schweiz) und aus dem Werkzeugbau für Druckgießwerkzeuge der Surtechno nv (Belgien).

Innerhalb der Projektlaufzeit liegt der Fokus auf der Markteinführung von MAGIT als großserientaugliches Verfahren zur Herstellung hohl dargestellter Leichtbaukomponenten sowie medienführender Druckgussbauteile. Neben den in der Abb. 8 dargestellten Demonstratorbauteilen wurden bereits Untersuchungen und Gießversuche mit Gussteilen aus dem industriellen Umfeld durchgeführt.

Das gießereitaugliche, flexible und bedienerfreundliche MAGIT-Powermodul (Abb. 7) lässt sich als Peripheriegerät an Kalt- und Warmkammerdruckgießmaschinen adaptieren.

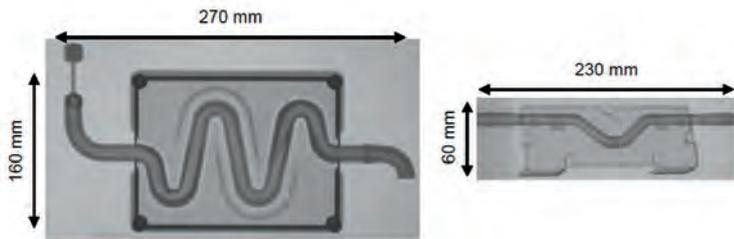
Das MAGIT-Powermodul ermöglicht die unabhängige Herstellung zweier Hohlkanäle, welches besonders für Druckgießwerkzeuge mit Mehrfachkavität von hoher Relevanz ist.

Innovative Fügeverfahren und beanspruchungsgerechte Designkonzepte für hybride Leichtbau CFK-Multimaterialverbunde

Abb. 7: Neuentwickeltes MAGIT-Powermodul PM500 zur Bereitstellung der Versorgungsmedien, Prozesssteuerung und -regelung sowie Prozessdatenerfassung und -visualisierung



7



8

Abb. 8: Röntgenaufnahme von zwei medienführenden Demonstratorbauteilen mit einem durch Gasinjektionstechnologie hergestellten Hohlkanal: Kanaldurchmesser 10 mm, Kanallänge 420 mm (links), Kanaldurchmesser 5 mm, Kanallänge 250 mm (rechts)

Im Rahmen des SmartPro Impulsprojektes InDiMat Förderkennzeichen 03FH4I03IA hat das Gießereilabor der Hochschule Aalen gezeigt, dass es möglich ist, kohlefaserverstärkten Kunststoff (CFK) mit Aluminium (Al-Si10Mg) und Magnesium (AM50HP) mittels unterschiedlicher Fügeverfahren miteinander zu verbinden. Konventionelle Fügeverfahren wie zum Beispiel Schraub- oder Nietverbindungen können dadurch durch das Druckumgießverfahren ersetzt werden und bieten demzufolge völlig neue Möglichkeiten bei der Konstruktion hybrider Druckgussbauteile. Die hierdurch entstehenden Festigkeitssteigerungen sowie die Gewichtsreduzierung der gefügten Gesamtkomponente werden bei zukünftigen PKW-Karosserieentwicklungen, insbesondere bei emissionsfreien Antriebskonzepten, zu funktionsintegriertem Leichtbau führen. Zudem können die Fügeverbindungen in den druckgussüblichen kurzen Prozesszyklen schnell, reproduzierbar hergestellt werden.

Die im Zuge des vom BMBF geförderten Vorhabens erforschten Fügeverfahren, Adhäsives Fügen, Thermisches Direktfügen und Druckumgießen, wurden abschließend anhand eines anwendungsnahen hybriden Leichtbau-Batteriegehäuses demonstriert, [Abb. 9](#).

Während des Druckgießprozesses werden hierbei zwei duroplastische CFK-Lamine in die Druckgieß-

form eingelegt, fixiert und mit einer Wandstärke von 2 mm umgossen. Zusätzlich werden, neben der Rippenstruktur zur Erhöhung der Bauteilsteifigkeit, Aussparungen für das spätere Anbringen adhäsiv gefügter und thermisch direktgefügter CFK-Lamine hergestellt.

Bei der Konstruktion des Druckgießwerkzeugs wurde auf ein komplexes Form-Temperierkonzept wie beispielsweise eine konturnahe Wasserkühlung der Auflageflächen der CFK-Lamine geachtet. Dies führt zu deutlich geringeren Erstarrungszeiten an den Fügestellen zwischen CFK und Aluminium- beziehungsweise Magnesiumschmelze. Aufgrund dessen kann die thermische Beeinflussung der CFK-Lamine während dem Umgießen mit Aluminium beziehungsweise Magnesium in diesem Bereich reduziert werden. Die Untersuchung des thermischen Schädigungsver-

haltens im hybriden Batteriegehäuse erfolgte mittels Schlifffildern, 3D-Röntgen-Computertomographie und Ultraschallmikroskopie. Speziell im Übergangsbereich zwischen CFK-Laminat und Aluminium wurden nur minimalste Porenbildungen nachgewiesen, [Abb. 10](#). Der entwickelte Demonstrator kann als CFK-Aluminium- und CFK-Magnesiumhybridbauteil hergestellt werden.

Neue Werkstoffe, Herstellverfahren und Anwendungen zur Herstellung von Druckgussbauteilen mit Leichtbaupotential für die Elektromobilität

Ein wichtiger Bestandteil bei der Entwicklung, Konstruktion und Herstellung von Fahrzeugkomponenten sind

Abb. 9: Hybrides Leichtbau-Batteriegehäuse zur Darstellung der untersuchten Fügeverfahren, adhäsives Fügen, thermisches Direktfügen und Druckumgießen.



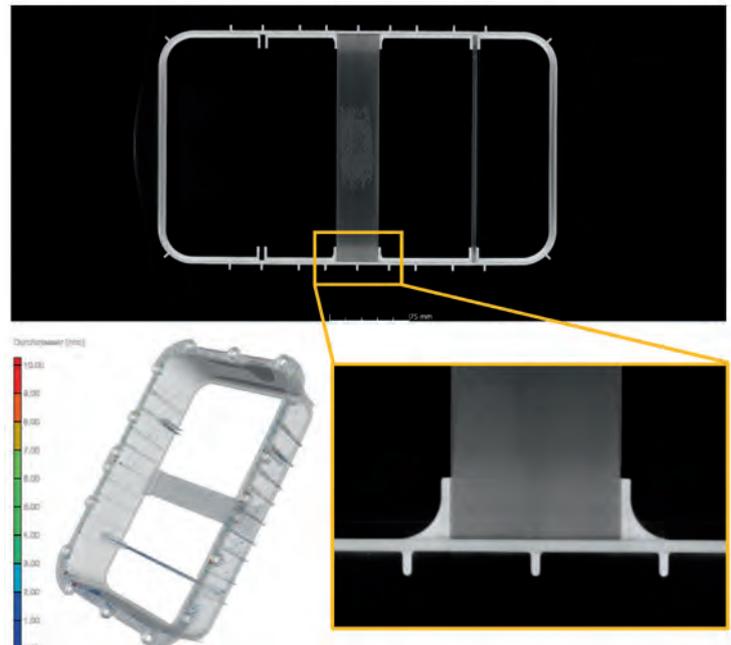
9

Abb. 10: 3D-Röntgen-Computertomographieaufnahmen der Fügestellen mit marginaler Porenbildung.

Leichtbaustrukturen aus Guss. Neue Anforderungsprofile an Bauteile des elektrifizierten Antriebstrangs, sowie der Trend zu größeren Fahrzeugstrukturbauteilen mit Funktionsintegration bieten neue Chancen bei der Herstellung von Druckgussbauteilen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen.

Ziel des Projektes InDruotec-E (Innovationsführerschaft bei Druckgusstechnologien für die Elektromobilität – neue Werkstoffe, Herstellverfahren und Anwendungen) ist es, durch innovative Entwicklungen die Technologieführerschaft im Druckguss von Leichtmetalllegierungen im Bereich der Elektromobilität zu übernehmen und weiter auszubauen. Bauteile im elektronischen Antriebsstrang müssen hohe Kräfte, Momente und Temperaturen aufnehmen können. Um dies zu bewerkstelligen werden massive Gusskonstruktionen mit Materialanhäufungen benötigt, was zu hohen Bauteilgewichten und lokalen Schwindungsporositäten führt. Für die geänderten Anforderungsprofile des elektrischen Antriebsstrangs werden daher neue, optimierte Werkstoff- und Herstellprozessinnovationen entwickelt. Im Bereich der Druckgießtechnologie bieten sich mehrere innovative Technologierouten zur Herstellung kosteneffizienter Bauteile an, mit dem Potential, das Gewicht einzelner Bauteilbereiche der Elektrofahrzeuge um 10 bis 30 % zu reduzieren. Gewichtsreduzierte Bauteile tragen in

10



der Herstellungs-, Nutzungs- und Verwertungsphase zu einer verbesserten CO₂-Bilanz bei.

Das Hauptaugenmerk dieses Forschungsvorhabens liegt auf Aluminium- und Magnesiumlegierungen mit hohen mechanischen Kennwerten, die durch Reduktion der Wandstärke hohe Einsparungen der CO₂-Emissionen erwarten lassen. Ein weiteres Kriterium bei der Auswahl hochfester Aluminiumlegierungen ist die Korrosionsbeständigkeit. Anhand einer Vorauswahl hochfester AL-Legierungen werden die mechanischen Kennwerte jeweils in einer Primär- und Sekundäraluminiumlegierungsvariante ermittelt und mit einer gängigen Druckgusslegierung (AlSi10Mg(Fe)) bezüglich der Werkstoffeigenschaften und Qualität verglichen. Zur Herstellung der Sekundärvarianten wurde das Toleranzintervall der Primärlegierungen durch die Legierungselemente Kupfer, Zink, Eisen und Silizium erweitert. Die Erweiterung des Toleranzintervalls ermöglicht es, den Recyclinganteil signifikant zu erhöhen.

Die Aluminium Rheinfelden Alloys GmbH stellte die hochfesten Aluminiumlegierung in Kooperation mit der Hochschule Aalen her. Um das Leichtbaupotential weiter auszuschöpfen, werden weitere Versuche mit Magnesiumlegierungen durchgeführt.

Plattengeometrien wurden unter Variation des Herstellverfahrens, konventionell, vakuumunterstützt und Vacural®, hergestellt und Flachproben zur Charakterisierung entnommen. Die hergestellten Platten wurden mittels Computertomographie vermessen und mit einer anschließenden Porositätsanalyse untersucht. Dadurch konnte eine erste Aussage darüber getroffen werden, mit welcher Kombination aus Herstellverfahren und Legierung die beste Bauteilqualität erreicht werden kann.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt der Hochschule Aalen ist die Weiterentwicklung des Vacural®-Druckgießverfahrens: zusammen mit dem Projektpartner Oskar Frech GmbH wurden die kritischen Punkte des Verfahrens bestimmt. So wurde die

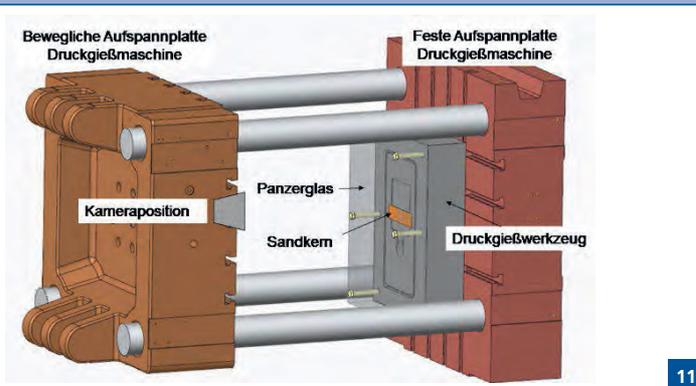


Abb. 11: Optisch zugängiges Druckgießwerkzeug mit Einlegekern zur Validierung der Simulationsmethodik

11

Anbindung des Saugrohrs an die Gießkammer, die Temperaturführung der Schmelze sowie die Anfälligkeit der Saugrohranbindung auf Leckagen bei den hohen Temperaturen als Problemstellen identifiziert. Diese wurden bei der Neuentwicklung der Gießkammer-Saugrohr-Einheit berücksichtigt, um einen sicheren und vereinfachten Prozess beim Vacural®-Druckgießprozess zu ermöglichen.

Mit Hilfe der Erkenntnisse erfolgt die bestmögliche Auslegung und Gestaltung des Demonstratorbauteils, das von dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hinsichtlich Kraftfluss sowie einer gleichmäßigen Wandstärkenverteilung optimiert wird.

Das zugrundeliegende Vorhaben wird seit Dezember 2020 mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) mit dem Förderkennzeichen 03LB2004F für einen geplanten Zeitraum von drei Jahren gefördert. Im Projekt arbeiten die Unternehmen Robert Bosch GmbH, Oskar Frech GmbH und Co. KG, Aluminium Rheinfeldens Alloys GmbH und die Gühning KG gemeinsam mit dem DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte und dem Gießereilabor der Hochschule Aalen an den technologischen Entwicklungen.

Entwicklung von mehrschichtigen Sandkernen für den Druckguss

Der Einsatz von verlorenen Kernen ist im Druckgießverfahren bislang

begrenzt. Dies liegt unter anderem an den hohen Einspritzgeschwindigkeiten der Schmelze in die Werkzeugkavität. Die daraus resultierenden Kräfte können bei unzureichender Kernlagerung sowie ungünstig gewählter Formstoffzusammensetzung zum Bruch der Sandkerne führen. Durch den hohen Druck in der Nachdruckphase penetriert die Schmelze in offene Poren der Sandkernoberfläche, was zu einer schlechten bzw. rauen Oberfläche führt. Im Gegensatz zu einer grobkörnigen Sand-Binder-Mischung sind feinkörnige Mischungen mit hohem Binderanteil eher für die Belastungen des Druckgießprozesses geeignet. Dabei stellt die Entkernung der Gussteile aufgrund der hohen Festigkeit über den gesamten Querschnitt der Kerne eine Herausforderung dar. Aufgrund der hohen Temperaturen der Schmelze (ca. 700°C) zerfallen die Binderbrücken in den schmelzenahen äußeren Bereichen der Sandkerne, innere Bereiche bleiben hochfest, was die Entkernung erschwert.

In Kooperation zwischen dem Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) der Technischen Universität München (TUM) und dem Gießereinstitut der Hochschule Aalen (GTA) wird ein zweistufiger Kernschießprozess entwickelt, um Verbundkerne unter Variation der Sand-Binder-Mischungen herzustellen. Das Forschungsvorhaben wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft

(DFG-505145110) mit einer Laufzeit von zwei Jahren gefördert.

Ziel ist die Quantifizierung der Belastungen in Abhängigkeit der Gießstrahlführung, -lenkung und -ausbreitung, die auf Sandkerne im Druckgießprozess wirken. Mit einer neu entwickelten Messmethodik werden Kernbelastungen charakterisiert und in eine Mehrskalen-Simulationsmethodik überführt. Die Simulationsmethodik soll die Belastungen beim Gießvorgang für konkrete Bauteilgeometrien vorhersagen und die Auswahl einer geeigneten Sieblinie auf Mikrostrukturebene erleichtern. Ein optisch zugängiges Druckgießwerkzeug lässt die Validierung der Simulationsmethodik zu (Abb. 11).

Um Kernbelastungen bei der Formfüllung zu charakterisieren, wird ein Prüfstand in transparenter Bauweise mit unterschiedlichen Segmenteinsätzen zur grundlegenden Untersuchung von Gießstrahlführung, -lenkung und -ausbreitung entwickelt. Ein Kunststoffeinlegekern, dessen Steifigkeitskennwerte denen von anorganischen Kernen entspricht, wird mit Dehnmessstreifen versehen. Als Medium kommt Wasser zum Einsatz, dessen Viskosität der von Aluminiumschmelze entspricht. Um die Anschnittgeschwindigkeit und die daraus resultierende Gießstrahlausbreitung zu variieren, ist eine integrierte Steuerung zur Regelung der Gießphasen geplant.

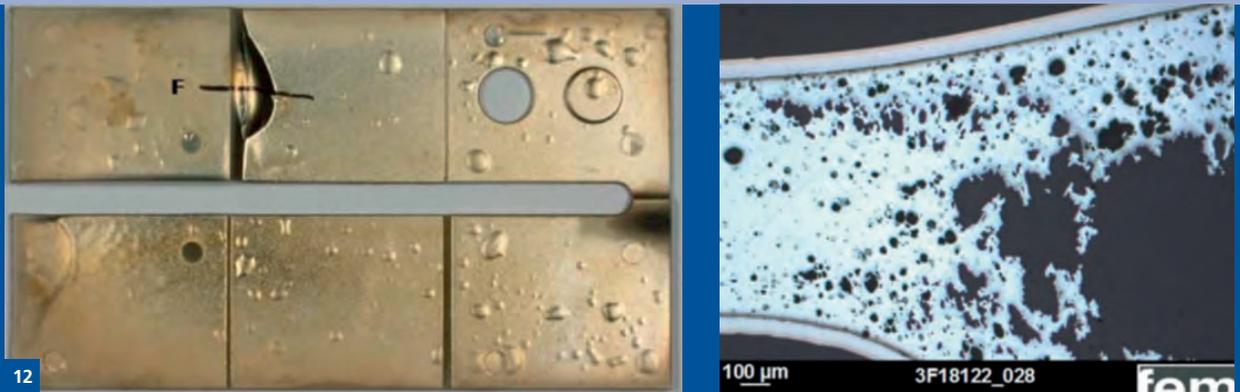


Abb. 12: Übersichtsaufnahme und Querschliff einer beschichteten Probe (Trennmittel 1, gealtert, Kunststoffgestrahl, cyanidischer Kupferelektrolyt), Schliffebene mit "F" gekennzeichnet

Zur Herstellung zweischichtiger Verbundkerne, bestehend aus Vorprodukt und verdichteter Außenhaut, wird ein Kernschießwerkzeug mit zwei von sich getrennten Kavitäten entwickelt. Das Vorprodukt, welches aus einer groben und weniger festen Sand-Binder-Mischung hergestellt wird, hält die Entgasung im inneren des Sandkerns aufrecht und soll das Entkernen deutlich erleichtern. In einem weiteren Kernschießzyklus wird das Vorprodukt in einer zweiten Kavität des Kernschießwerkzeugs mit einem feinkörnig und harten Sand-Binder-Gemisch umschossen.

Zur Ermittlung der mechanischen Dehnung, resultierend aus den Gießstrahlkräften während der Formfüllung, werden in das zweischichtige Kernsystem Faser-Bragg-Gitter eingebracht, um diese im Prüfstand experimentell zu untersuchen. Parallel wird mit einer Hochgeschwindigkeitskamera der Gießstrahl sowie die Kerndeformation während der Formfüllung aufgenommen und analysiert. Das aufgenommene Bildmaterial, das mit einem Algorithmus zur digitalen Bildkorrelation (DIC) bereits erfolgreich bei der UTG eingesetzt wird, gibt zusätzlich Aufschluss über die Verformung der Sandkerne in Ab-

hängigkeit des Gießsystem und der Prozessparameter. Die Erkenntnisse aus umfangreichen Einzelversuchen fließen in die Mehrskalen-Simulationsmethodik mit ein.

Zur Validierung der Simulationsmethodik ist ein optisch zugängliches Druckgießwerkzeug mit Panzerglascheibe geplant, das eine Übertragung der im Prüfstand eingesetzten Messtechnik erlaubt (Abb. 11). Mehrschichtige Sandkerne, deren Formstoffzusammensetzung eine gute Beständigkeit zeigen, werden im transparenten Druckgießwerkzeug umgossen. Auf einem Einzelschlag-Entkernprüfstand wird der Kernzerfall und somit der Entkernvorgang untersucht.

ZiBe3: Einfluss des Wasserstoff-Eintrags auf die galvanische Beschichtbarkeit von Zinkdruckguss und Entwicklung von Maßnahmen zur Vermeidung (AiF/IGF-Vorhaben-Nr. 22574 N/2)

Über 50 % der im Druckgießverfahren hergestellten Zinkbauteile werden galvanisch beschichtet. Die Beschichtung dient je nach Art als Korrosionsschutz oder als dekorative Oberfläche. Der Ausschuss durch unbrauchbaren, galvanisierten Zinkdruckguss kann bis zu 50 % betragen und tritt erst am Ende einer langen Wertschöpfungskette in Erscheinung.

Eine wesentliche Erkenntnis aus dem Vorhaben ZiBe1 (AiF/IGF-Vorhaben-Nr.

19483 N) war überraschenderweise, dass Wasserstoff für eine Vielzahl von Problemen bei der Beschichtung von Zinkdruckgusserzeugnissen verantwortlich gemacht werden kann. Dabei konnte gezeigt werden, dass insbesondere das Eindringen von Wasserstoff während der Vorbehandlungs- und Beschichtungsprozesse Ursache für die Blasenbildung von galvanisiertem Zinkdruckguss sein kann (Abb. 12). Dabei deuten sich Unterschiede in Abhängigkeit von der Gusshaut-Struktur und deren Zusammensetzung an.

Zur näheren Untersuchung wurden Querschliffe an betroffenen Stellen angefertigt und am REM betrachtet. Hierbei zeigt sich, dass die Beschichtung, bestehend aus einer roten Kupferschicht und einer grauen Nickelschicht, fest mit der Gusshaut verbunden ist. Die Probe wurde demnach von innen heraus aufgebläht, sodass die Gusshaut mit Beschichtung vom Grundmaterial getrennt wurde. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass Wasserstoff, der bei den Vorbehandlungs- und Beschichtungsprozessen entsteht, elementar in das Bauteil eindringt und unterhalb der Gusshaut zu H_2 -Molekülen rekombiniert. Dabei kommt es zu einer sprunghaften Volumenzunahme, der Druck im Inneren steigt. Durch erhöhte Temperaturen, wie sie beim Thermoschocktest auftreten, kommt es zur Verringerung der mechanischen Eigenschaften des Materials, sodass sich Blasen bilden können.



Abb. 13: Probengeometrie für ungekerbte und mild gekerbte Flachproben

Die systematische Untersuchung der Rolle des Wasserstoffs, die bisher nicht im Fokus der F&E-Aktivitäten stand, soll daher im Rahmen des Folgeprojektes ZiBe3 untersucht werden.

Bislang ist die Löslichkeit und Speicherung von Wasserstoff in Zinkdruckgusslegierungen kaum erforscht. Laut [4] weist Reinzink sowohl in der Schmelze als auch im festen Zustand nur eine sehr geringe Wasserstofflöslichkeit auf. Da gängige Zinkdruckgusslegierungen einen erheblichen Anteil an Legierungselementen aufweisen können, ist dort von einer gewissen Wasserstofflöslichkeit in Abhängigkeit von den Legierungselementen auszugehen. Im Rahmen des Projekts soll die Wasserstoffaufnahme verschiedener Zinklegierungen untersucht werden, insbesondere im Hinblick auf den Einfluss des Aluminium- und Kupfergehalts. Dabei soll der gesamte Fertigungsprozess betrachtet werden, beginnend bei der Legierungsherstellung bis hin zur Wasserstoffentstehung bei der galvanischen Beschichtung.

Anhand von Permeationsmessungen soll zwischen diffusilem und – reversibel oder irreversibel – gebundenem Wasserstoff differenziert werden.

Dabei erfolgt idealerweise eine Korrelation zwischen Menge an gebundenem Wasserstoff und Beschaffenheit der Gusshaut. Aus diesen Ergebnissen sollen am Ende Prozessempfehlungen

abgeleitet werden, die dem Hersteller von Druckgussteilen die Herstellung von Bauteilen ermöglicht, die „unempfindlich“ gegenüber der Wasserstoffexposition sind und optimal besser beschichtbar sind.

Das IGF-Vorhaben 22574 N/2 wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert und vom Projektbegleitenden Ausschuss durch Sach- und Beratungsleistungen unterstützt.

Zynk-Guss: Analyse des quasi-statischen und zyklischen Werkstoffverhaltens von modernen Zinkdruckgusslegierungen zur Feststellung der Werkstoffeignung für zyklisch beanspruchte Bauteile unter Berücksichtigung spannungsmechanischer, technologischer und statistischer Größeneinflüsse (AIF/IGF Vorhaben Nr.: 21900N)

Zinkdruckgusslegierungen werden heute in vielen Industriebereichen, insbesondere aufgrund ihrer hohen Oberflächen- und Bauteilgüte, für quasi-statische oder niederzyklische Anwendungen eingesetzt. Jedoch

kommen Zinkdruckgusslegierungen noch sehr wenig für zyklisch hochbeanspruchte Bauteile zum Einsatz, da Kennwerte und Bemessungsmethoden für die Beschreibung des zyklischen Werkstoffverhaltens fehlen. Insbesondere zum zyklisch transienten Werkstoffverhalten, auch unter Berücksichtigung eventueller Alterungseffekte sowie spannungsmechanischer, technologischer und statistischer Größeneinflüsse, gibt es bisher keine Erkenntnisse.

Ziel des Projektes ist die Beschreibung des zyklischen Werkstoffverhaltens der Zinkdruckgusslegierungen Z400, Z410 und Z430 sowie der aluminiumreicheren Legierungen ZA8 und ZA12 durch spannungs- und dehnungs-geregelte Schwingfestigkeitsversuche unter Berücksichtigung von geometrischen, statistischen und technologischen Größeneinflüssen sowie der Werkstoffalterung. Dabei soll der Einfluss des Aluminium- und Kupfergehalts auf die Schwingfestigkeit untersucht werden. Weiterhin sollen der Einfluss der Porosität, unterstützt durch CT-Untersuchungen mit Porositätsanalyse, der Einfluss unterschiedlicher Temperaturen sowie Einflüsse unterschiedlicher Gießparameter bei ausgewählten Legierungen untersucht werden.

Durch die unterschiedlichen Probengeometrien (Abb. 13) werden sowohl spannungsmechanische, statistische und technologische Größeneinflüsse



untersucht und in Korrelation zu der ermittelten Schwingfestigkeit gesetzt.

Aufgrund des zu ermittelnden Werkstoffverhaltens sowie des darauf aufzubauenden Bemessungskonzeptes soll eine Beurteilung stattfinden, ob sich die Werkstoffe zur Anwendung bei zyklisch hochbelasteten Bauteilen eignen und Anwendungsgrenzen definiert werden. Ebenso können bestehende Sicherheitsfaktoren bei der Bauteilauslegung überprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

Das Projekt wird unter der Leitung des Fraunhofer LBF, zusammen mit der Hochschule Aalen, dem Lehrstuhl und Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau (IWM) der RWTH

Aachen University, Legierungs- und Maschinenherstellern sowie Gießereien und Anwendern durchgeführt.

Das IGF-Vorhaben 21900N wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert und vom projektbegleitenden Ausschuss durch Sach- und Beratungsleistungen unterstützt.

Literatur

- [1] Forst Baden-Württemberg [Online] <https://www.forstbw.de/wald-im-land/klimaschuetzer/co2-bilanz/>. (Zugriff am 28.06.2021)
- [2] Ashby M.: Materials selection in mechanical design. 5. Auflage, Butterworth-Heinemann, 2017. ISBN 978-0081005996
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [Online] <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2020/12/kapitel-1-11-leichtbau.html>. (Zugriff am 02.07.2021)
- [4] Moon, I.H.: Hydrogen Diffusion in Zinc, Kunmsok Hakhoe Chi, 9(3 4), 158-164, 1971

Formsandaufbereitung nach Maß

Eirich ist ihr Experte für Maschinen und Anlagen zur Aufbereitung von Formstoffen und arbeitet seit Jahrzehnten mit den besten Gießereien, Formanlagenherstellern und Forschungseinrichtungen zusammen. Eirich-Aufbereitungsanlagen gewährleisten eine hohe Energieeffizienz, schonen Ressourcen und optimieren Prozesse bis hin zur autonomen Formstoffaufbereitung. Viele, weltweit installierten Sandaufbereitungsanlagen für Grau-, Stahl- und NE-Guss versorgen Formanlagen aller bedeutenden Hersteller und sind Benchmark in Qualität, Durchsatz und Wirtschaftlichkeit.

Das EVACTHERM®-Verfahren stellt trotz schwankender Bedingungen eine konstante, reproduzierbare

Formstoffqualität sicher. Hierbei findet Homogenisierung, Kühlung und Aktivierung in nur einem Mischer statt.

Für mehr Ressourceneffizienz und Umweltschutz wurde auch ein modulares Formstoffprüfgerät mit intelligenten Steuerungsmöglichkeiten entwickelt. Die Möglichkeiten reichen von der einfachen Qualitätseinstufung bis hin zum präventiven Formstoffmanagement, das automatisierte Prozesse ermöglicht. Auf der GIFA 2023 stellt Eirich besonders die Nachhaltigkeit und Effizienz seiner Lösungen in den Mittelpunkt der modernen und digitalen Ausstellung. Fachbesucher können in Düsseldorf die Eirich-Welt entdecken und erleben. Zudem kann das erweiterte

Formstoffprüfgerät QualiMaster AT1 live am Stand besichtigt werden.

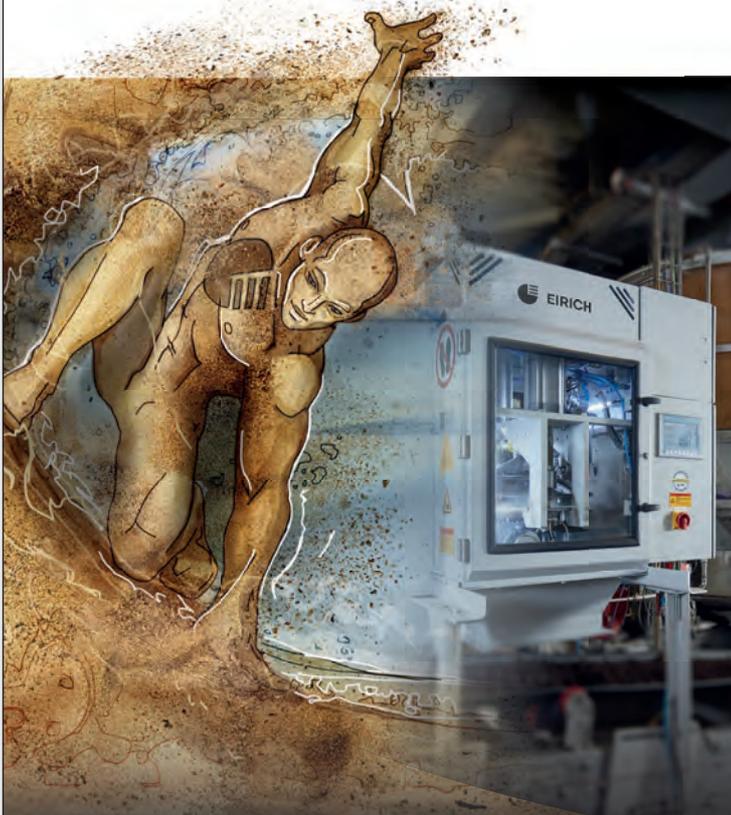
Eirich stellt auf der GIFA 2023 in der Halle 17 Stand C61 aus.

Autoren: Maria-Luise Liepe, Maximilian Dunkel

Kontakt

**Maschinenfabrik
Gustav Eirich GmbH & Co KG**
Walldürner Str. 50
D-74736 Hardheim
Tel.: +49 (0)6283 510
sales@eirich.de
www.eirich.de

Eirich QualiMaster AT1



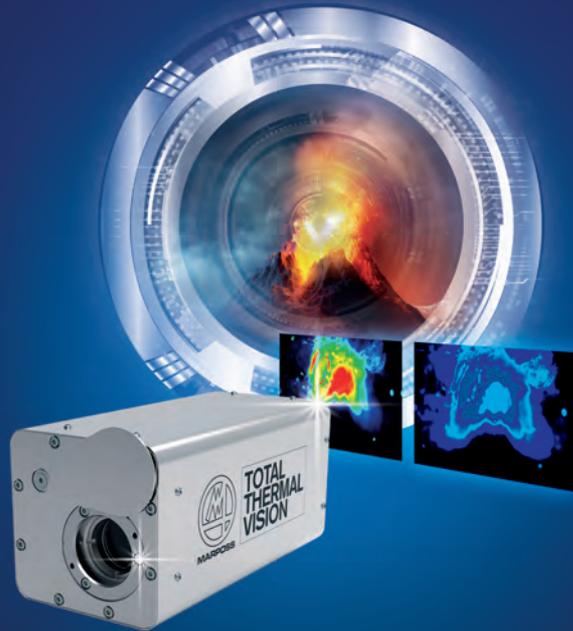
Schritt für Schritt zur idealen Formstoffqualität

Die neueste Generation des führenden Inline-Qualitätssystems.

Verdichtbarkeit, Scherfestigkeit, Verformbarkeit, Springback, Gasdurchlässigkeit, Temperatur – Die wichtigsten Kennzahlen für eine gesteigerte Gussteilqualität und automatisierte Prozesse.

TOTAL
THERMAL
VISION

THE FUTURE IN FOUNDRY



TEMPERATURÜBERWACHUNG
FÜR
DRUCKGUSSFORMEN



MARPOSS

www.marposs.com

VISIT US

HALL 11 - STAND 11A59

GIFA



12-16 JUNE
DÜSSELDORF
GERMANY **2023**

GIFA

15. INTERNATIONALE GIESSEREI-
FACHMESSE MIT TECHNICAL FORUM

Neues KI-Tool : RWP Analytics® – hält Ihren Produktionsprozess auf Kurs

RWP Analytics® digitalisiert Ihre Prozesse und sorgt für Durchblick in Ihrer Produktion. Echtzeit-Prozessdaten werden erfasst, dargestellt und ausgewertet. KI Elemente sorgen für gleichbleibende Qualität bei minimalem Ausschuss.

Vermeiden Sie das Geldverbrennen, halten Sie den Produktionsprozess stabil und erreichen Sie eine nachhaltige Produktion mit geringem CO₂-Footprint. Praktisch aus der Vogelperspektive betrachten Sie von Ihrem Arbeitsplatz den gesamten Produktionsprozess. Rohstoff- und Energieeinsatz, Maschineneinstellungen, Sensordaten, Ausschuss- und Qualitätsdaten werden zusammengeführt. KI-gestützte Methoden finden Interdependenzen sowie Trends, decken versteckte Zusammenhänge auf und liefern Ihnen optimierte Prozessfenster. RWP Analytics® hält Ihren Prozess auf Kurs.



Ermittlung der Limits für das Prozessfenster

RWP Analytics® ermittelt die optimalen Grenzen, die Ihnen einen stabilen Prozess mit minimalem Ausschuss garantieren. Es kommen insbesondere auch für Gießereien entwickelte Algorithmen der modernen Statistik zum Einsatz. Alle Messdaten aus Ihren Datenbanken können sofort in die Auswertung eingebunden werden.

Online-Monitoring mit Trendvorhersage

Mit der Parametertrendvorhersage sind Sie Ihrem Prozess einen Schritt voraus. Aus den erfassten Echtzeit-Prozessdaten entwickelt RWP Analytics® eine Trendvorhersage für die zukünftige Entwicklung der Parameter. Dies ermöglicht Ihnen ein frühzeitiges Eingreifen, so dass Sie stets innerhalb der Grenzen Ihres Prozessfensters bleiben.

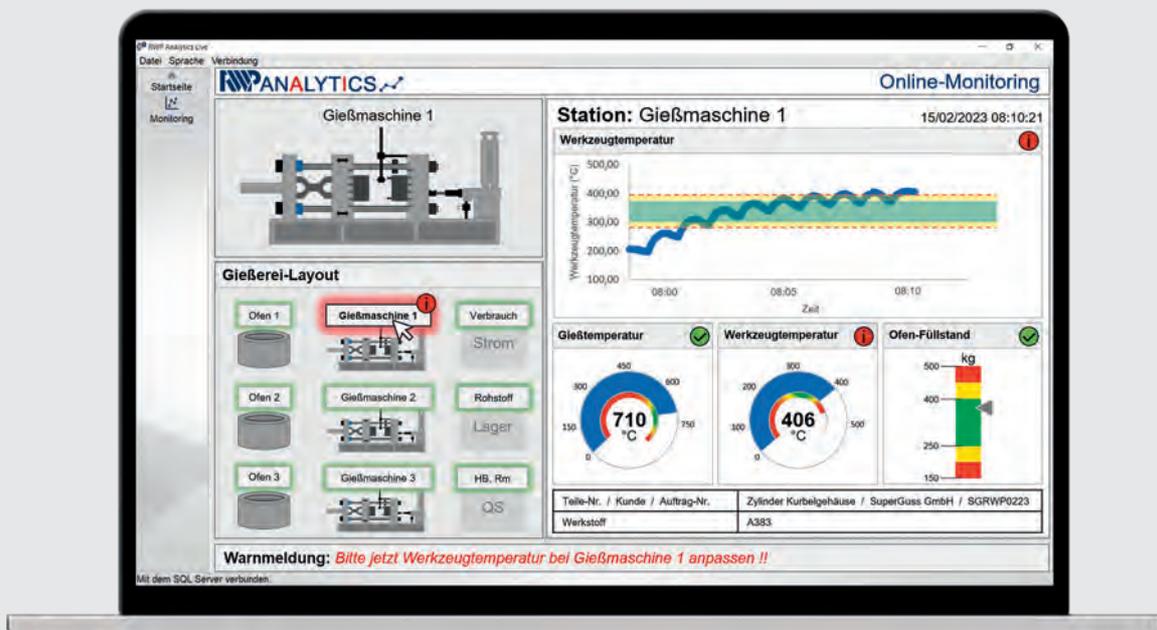
Sofort erhältlich!

RWP Analytics® im Einsatz auch auf der GIFA 2023

Halle 12, Stand A50

Kontakt

RWP Gesellschaft beratender Ingenieure für Berechnung und rechnergestützte Simulation mbH
 Bundesstraße 77
 D-52159 Roetgen
 Tel.: +49 (0)2471 1230-0
 info@rwp-group.de
 www.rwp-group.de





Prof. Dr.-Ing. Babette Tonn
Professorin für Gießereitechnik

Gießereitechnik an der TU Clausthal
Institut für Metallurgie

Autoren:

M. Sc. Felix Braun
M. Sc. Vanessa Glück Nardi
M. Sc. Julius Gogolin
M. Sc. Patrick Lachart
M. Sc. Sohail Mansoor
M. Sc. Felix Stieler





Gießereitechnik an der Technischen Universität Clausthal



In der Gießereitechnik an der Technischen Universität Clausthal setzen wir den Fokus auf Energie- und Ressourceneffizienz bei Schmelz- und Gießprozessen. Werkstoff- und Prozesskompetenz sind dabei für uns essentielle Schlüsselfaktoren. Mit folgenden Themen wollen wir Ihnen einen Überblick über unsere laufenden Projekt geben.

Einflussgrößen auf die Graphitmorphologie in GJS

Der Wechsel auf erneuerbare Energien fordert unter anderem immer größer werdende Windkraftanlagen. Hierzu werden massivere Anlagen von Nöten, was zur Folge hat, dass Bauteile mit größeren Wanddicken ausgelegt werden müssen. Dies führt zu Problemen in der Graphitbildung während des Erstarrungsprozesses von Gusseisen mit Kugelgraphit. Gerade langsame Erstarrungszeiten in Verbindung mit hohen Siliziumgehalten führen zur Bildung von degeneriertem Graphit. Darüber hinaus werden Graphitentartungen durch Störelemente bereits in sehr geringen Gehalten hervorrufen. Gerade Elemente wie Cer oder Antimon können sich besonders schädlich auswirken. Folge der Graphitentartungen ist die Herabsetzung der mechanischen Eigenschaften.

In einem 2021 gestarteten und vom BMWi geförderten Projekt „DeGra“ werden die Einflüsse von degeneriertem Graphit auf das zyklische Werkstoffverhalten von Gusseisen mit Kugelgraphit für dickwandige Komponenten untersucht. Mit Projektpartnern aus der Gießereiindustrie, industriellen Anwendern und dem Fraunhofer LBF werden die interagierenden Einflüsse von Erstarrungszeit, Silizium- und Störelementgehalten verschiedener Gusseisenlegierungen auf Art und Ausmaß von Graphitentartungen und resultierenden quasi-statischen und zyklischen mechanischen Eigenschaften umfassend untersucht. Dazu wurden Gusseisen mit verschiedenen Störelementgehalten (Cer für Chunky- und Antimon für Spikygraphit) abgegossen. Der Siliziumgehalt wurde in drei Stufen variiert. Als Probeformen kamen je eine Y4-, eine isolierte Y4-Form und ein isolierter Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm zum Einsatz. So konnten unterschiedliche Erstarrungszeiten von 30 bis 166 Minuten dargestellt werden. Anschließend wurden Proben aus dem geometrischen Zentrum entnommen und metallographisch untersucht. Zunehmende Störelementgehalte erhöhten die Anteile an Spiky- oder Chunky-Graphit. Mit steigendem Siliziumgehalt erhöht sich

je nach Störelementgehalt der Anteil an Chunky-Graphit.

Abbildung 1 zeigt ein tiefengeätztes Gefüge von GJS mit ausgeprägtem Spikygraphit, der durch ca. 90 wt-ppm Antimon in der Schmelze verursacht wurde. **Abbildung 2** zeigt ebenfalls eine mit Nital tiefengeätzte REM-Aufnahme. Hier wird bei einer Cer-haltigen Probe das Graphitnetzwerk des Chunkygraphits, welches in einem ebenen Schliff nicht erkennbar ist, sichtbar.

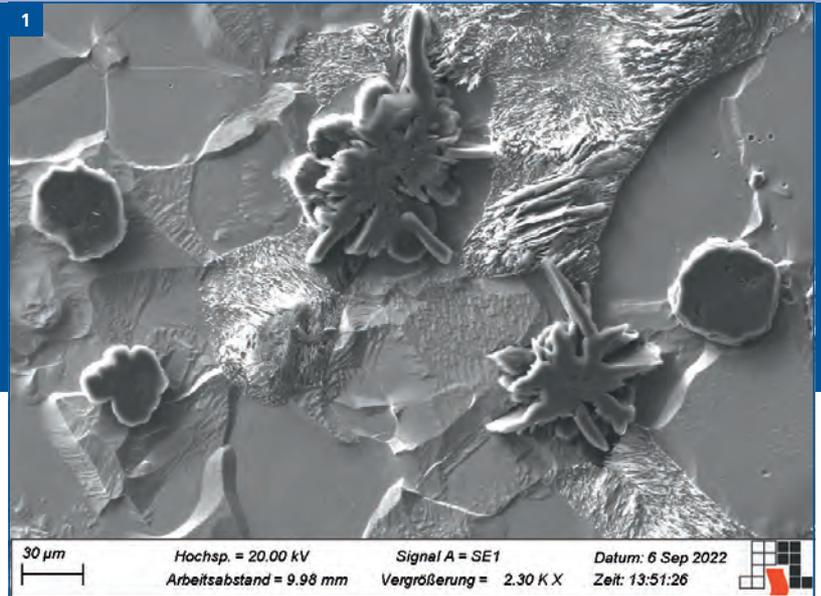
Darüber hinaus wurden Cer und Antimon in verschiedenen Verhältnissen gemeinsam legiert, da die Zugabe der beiden Elemente die Ausprägung von

Kontakt

Institut für Metallurgie

Prof. Dr.-Ing. Babette Tonn
Robert-Koch-Straße 42
D-38678 Clausthal-Zellerfeld
Tel.: +49 (0)5323 722014
Fax: +49 (0)5323 723527
Giessereitechnik@tu-clausthal.de
www.imet.tu-clausthal.de/abteilungen

Abb. 1: Mit Nital tiefgeätztes Gusseisen mit Kugelgraphit mit Antimon – entarteter Graphit in Spikyform sichtbar.



degeneriertem Graphit mildern oder gar ganz aufheben können. So können mögliche Interaktionen der Elemente und resultierende Auswirkungen auf die Ausbildung des Graphits untersucht werden, um im späteren Gießbetrieb Graphitdegenerationen zu vermeiden oder auf ein vernachlässigbares Minimum einzuschränken. Ausgehend von den Ergebnissen der Laboruntersuchungen wurden in der Industrie Y4 Proben mit unterschiedlichen Gehalten an Antimon abgegossen und für die Bestimmung zyklischer mechanischer Eigenschaften in Abhängigkeit vom Anteil entarteten Graphits genutzt.

Einfluss von Graphitarten auf die mechanischen Eigenschaften von Gusseisen mit Kugelgraphit

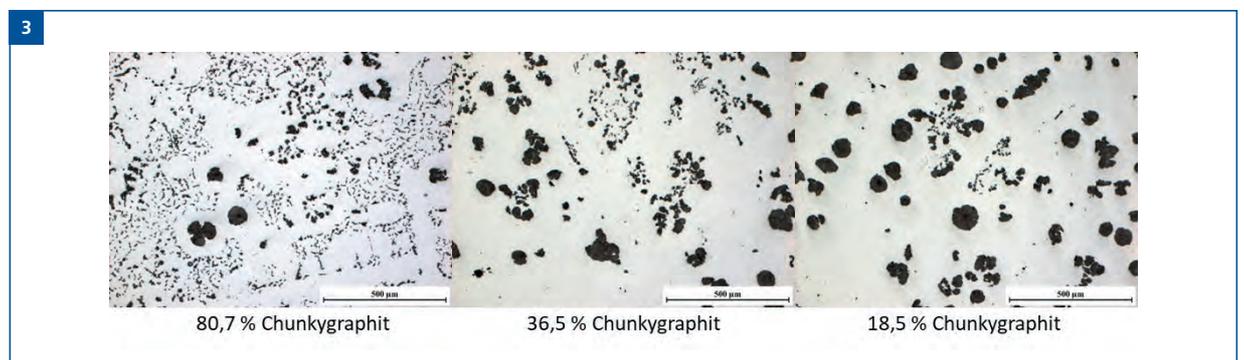
Aufgrund seiner herausragenden mechanischen Eigenschaften gehört

Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) zu den leistungsfähigsten Gusswerkstoffen auf dem Markt. Bis zu 900 MPa Zugfestigkeit oder 22 % Bruchdehnung können je nach Legierungszusammensetzung gezielt eingestellt werden. Die morphologische Graphitbildung zur Kugel ist maßgeblich entscheidend für die zu erreichenden mechanischen Eigenschaften. Aus der Literatur ist bekannt, dass Stör-elemente wie Cer und Antimon die kugelförmige Graphitbildung negativ beeinflussen können. Die morphologische Abweichung äußert sich in Graphitdegenerationen, welche bekanntlich einen reduzierenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben. Jedoch ist die aktuelle Datenlage zur Korrelation von Graphitentartungsanteilen (flächengew.-%) mit resultierenden mechanischen Eigenschaften bestenfalls

lückenhaft. Zur Erweiterung der Beurteilungsfähigkeit ist die empirische Aufstellung einer solcher Beziehung zielführend.

Das von der AiF-Forschungsvereinigung geförderte Projekt beschäftigt sich mit der Aufstellung solcher Zusammenhänge. Dabei werden für die quasi-statische und zyklische mechanische Prüfung gezielt Graphit-entartungsanteile in vollferritischen Gusseisen mit Kugelgraphit (EN-GJS-450-18) erzeugt (Abbildung 3). Die Ergebnisse der mechanischen Prüfung werden anschließend mit den Graphitentartungsanteilen korreliert. Somit soll die Fähigkeit zur Bewertung von ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit und auftretender Graphitentartung erweitert werden. Zudem wird die Übertragbarkeit des erstellten Bezugsmodells zu Werkstoff-

Abb. 3: Erzeugte Graphitentartungsanteile (hier: Chunkygraphit) für die quasistatische und zyklische Prüfung.



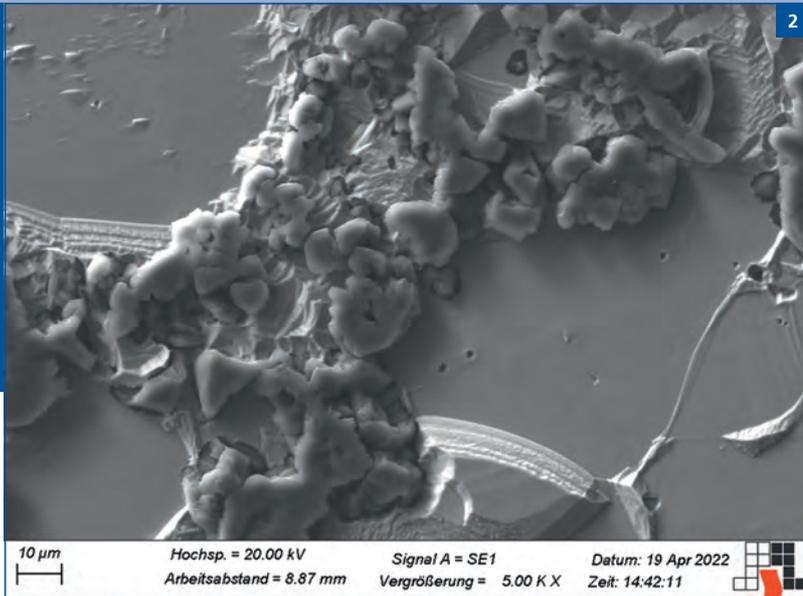


Abb. 2: Durch Tiefenätzung mit Nital freigelegtes Chunkygraphitnetzwerk in Gusseisen mit Kugelgraphit mit Cer.

fen ähnlicher Legierungszusammensetzung überprüft.

Alternative Beschreibung der Graphitmorphologie in Gusseisen mit Kugelgraphit

Gusseisen mit Kugelgraphit gehört zu den herausragendsten Gusswerkstoffen in der Gießertechnik. Kostengünstige Produktions- und Verarbeitungskosten in Kombination mit sehr guten mechanischen Eigenschaften ermöglichen ein breites Anwendungsfeld der Werkstoffe.

Dabei sind die resultierenden mechanischen Eigenschaften insbesondere vom zu Grunde liegenden Gefüge abhängig. Im Detail ist die morphologische Ausbildung der Graphitphase maßgeblich mit entscheidend. Die detaillierte Beschreibung möglicher Graphitmorphologien, Form I bis VI, ist bereits durch die Norm DIN EN 945 1, 2 und 4 bekannt. Auch wenn durch die Norm mathematische Richtlinien, wie die Nodularität, basierend auf der Graphitpartikelrundheit, zur Einteilung der unterschiedlichen Gra-

phitmorphologien erhoben wurden, konnten bis dato keine mathematischen Regularien zur Beschreibung von Graphitentartungen wie Chunkygraphit aufgestellt werden. Da durch die Beschreibung des Phänomens die essenzielle Grundlage für den Aufbau von Entstehungstheorien und Präventionsmaßnahmen von Graphitentartung definiert wird, ist die mathematisch objektive Definition dieser Graphitmorphologien zielführend.

Abb. 4: links: Verteilung des Feret Verhältnisses eines Datensatzes mit und ohne Graphitentartung, rechts oben: Referenzgefüge Gusseisen mit Kugelgraphit, rechts unten: Anteile an Chunkygraphit in Gusseisen mit Kugelgraphit.

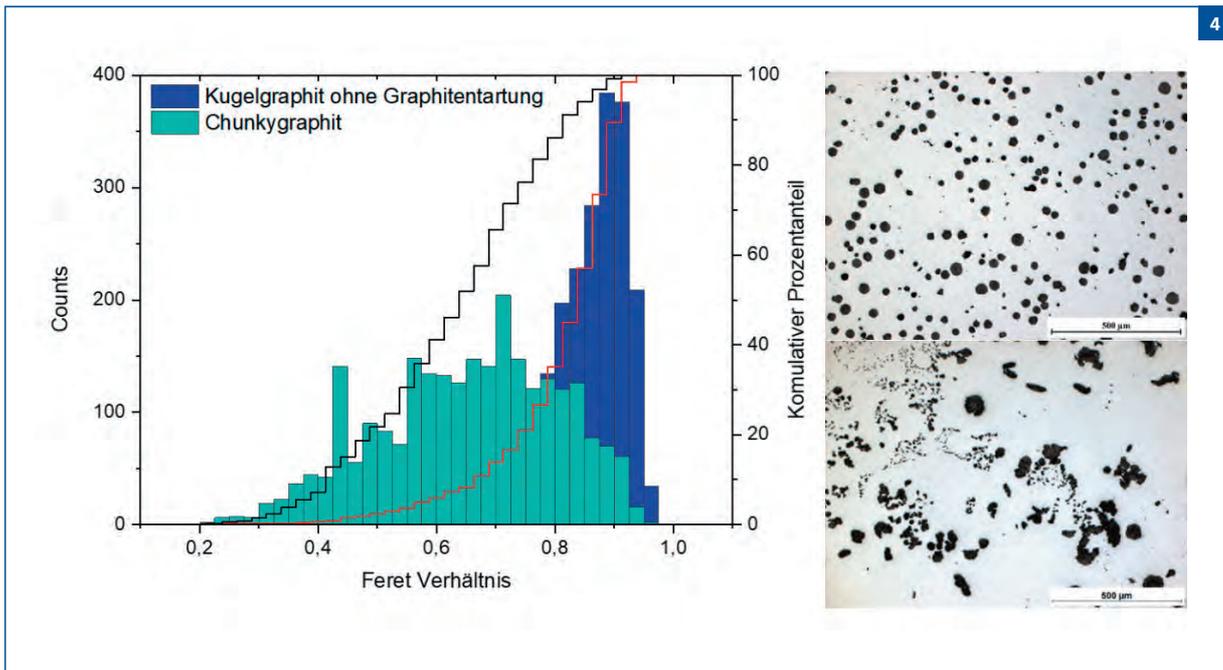
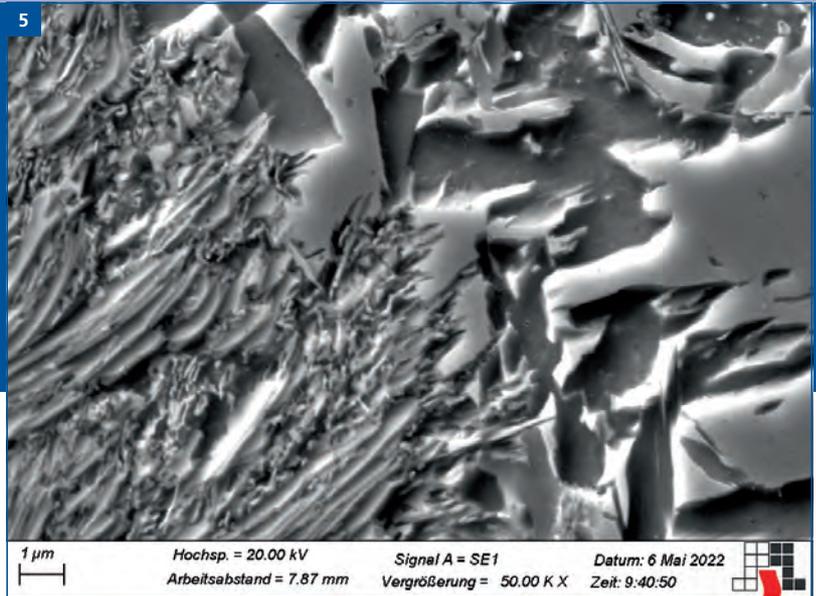


Abb. 5: Phasengrenze von Perlit zu Ausferrit.



Ein alternativer Ansatz zur Beschreibung der Morphologie von Graphitentartungen ist die mathematisch-statistische Analyse der 2D-Graphitparameter Rundheit, Kompaktheit, Sphärizität, Nächster-Nachbar-Abstand, Feret Verhältnis, Graphitpartikelfläche und Konvexität. Dabei wird der Fokus auf die Abweichung der Verteilung der Graphitparameter mit und ohne Graphitentartung gelegt und kann bereits durch die Aufstellung einfacher Histogramme mit kumulativen Prozentkurven dargestellt werden (**Abbildung 4**) Das Forschungsvorhaben beschäftigt sich mit der Aufstellung einer numerischen Funktion, basierend auf statistischen Methoden, zur objektiven Beschreibung und Separation der entarteten Graphitmorphologie zu den bereits beschriebenen Morphologien in der DIN EN 945. Die Durchführung des Projekts erfolgt durch die Gießereiabteilung des IMET'S der TU Clausthal in Kooperation mit der Abteilung für Statistik und Datenanalyse des Instituts für Wirtschaftswissenschaften der Universität Bielefeld.

Potenzial und Grenzen des mischkristallverfestigten Gusseisens mit Kugelgraphit

Ziel dieses Projektes in enger Zusammenarbeit mit einer Gießerei ist die Entwicklung eines zusammensetzungstoleranten mischkristallverfestigten Gusseisens mit Kugelgraphit mit erhöhten mechanischen Eigenschaften unter der Voraussetzung,

den Si-Gehalt lokal im Gefüge geringer als 4,2 Gew.-% zu halten.

Ein hoher Siliziumgehalt ist erforderlich, um eine effektive Mischkristallverfestigung zu erreichen. Gleichzeitig ist bei diesen Sorten der Toleranzbereich für den Siliziumgehalt insbesondere bei dickwandigeren Bauteilen deutlich kleiner. Wird Silizium im Überschuss zulegiert oder die Ausbeute falsch eingeschätzt, führt dieser Überschuss durch die Seigerung des Siliziums lokal zu einer Materialversprödung, die letztendlich zum vorzeitigen Ausfall des Bauteils führen kann. Die Ursache der Materialversprödung ist seit langem Gegenstand internationaler Forschung.

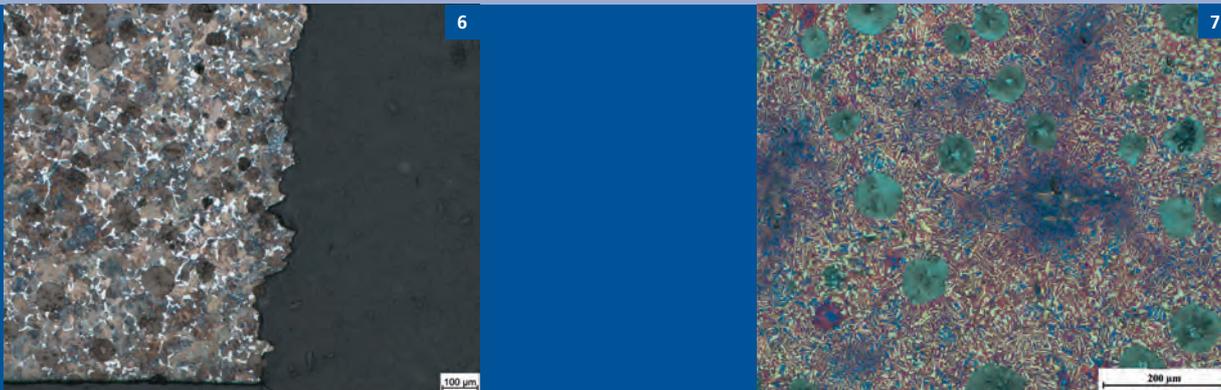
Derzeit liegt der EN-GJS-600-10 an der Obergrenze der mechanischen Eigenschaften, was bedeutet, dass das zugehörige Prozessfenster in Bezug auf die Legierungstoleranz sehr eng ist. Die Seigerungseffekte bei dickwandigen Bauteilen größer 30 mm verstärken diesen Effekt zusätzlich. Dieses „Umkippen“ der Legierungseigenschaften kann unter anderem dadurch umgangen werden, dass Silizium teilweise durch alternative Elemente ersetzt und dennoch eine höhere Mischkristallverfestigung erreicht wird.

Das Ziel, Forderungen nach anspruchsvolleren mischkristallverfestigten Legierungen gerecht zu werden, soll hier aus zwei Richtungen erreicht werden:

- Statistisch geplante Versuche, mathematische Modellierung und thermodynamische Simulation werden zur Entwicklung eines mischkristallverfestigten Gusseisens verwendet, das sich toleranter gegenüber prozessbedingten Schwankungen beim Legieren verhält und somit in die bestehende Prozessroute der Gießerei integriert werden kann.
- Der innerbetriebliche Prozessweg wird optimiert, um mehr Prozesssicherheit und -robustheit zu bieten und weniger auf Erfahrungswissen zurückzugreifen. Dazu werden Steuerungs- und Einflussmöglichkeiten definiert, die prozesskonform umgesetzt werden können. Eine Grundlage hierfür ist die thermische Analyse der Schmelze, die weiterentwickelt und zur Korrelation der Prozessparameter mit Gefüge und Eigenschaften der mischkristallverfestigten Gusseisen genutzt werden soll.

Dickwandige Bauteile aus ADI

Austempered Ductile Cast Iron (ADI) ist ein moderner Gusswerkstoff mit



hervorragenden mechanischen Eigenschaften, die ihn neben Stahl und Aluminiumgusslegierungen zu einem konkurrenzfähigen Werkstoff für hochbelastete Bauteile machen. Während der Wärmebehandlung wird es mit steigender Wandstärke der Gussteile jedoch immer schwieriger, ein homogenes, rein ausferritisches Matrixgefüge in allen Bereichen des Bauteils einzustellen. Durch den Einsatz von Legierungselementen kann der perlitische Anteil verringert werden, jedoch nehmen Seigerungen an den Korngrenzen und damit eine Versprödung des Werkstoffs zu.

In einem 2021 gestarteten Projekt wurden Demonstratorbauteile aus ADI mit Wanddicken von bis zu 300 mm eingehend untersucht. Vom Rand ausgehend liegt dabei zuerst ausferritisches Gefüge mit einem hohen Restaustenitgehalt, gefolgt von einer Mischung aus Ausferrit und Perlit und in Zentrumsnähe und im Zentrum überwiegend Perlit vor.

Abbildung 5 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines solchen Mischgefüges.

Im Ergebnis liegen in verschiedenen Tiefen des Bauteils den Gefügeanteilen entsprechend unterschiedliche quasi-statische und zyklische mechanische Eigenschaften vor. Um eine Korrelation zwischen relevanten Gefügeparametern und den zyklischen Werkstoffkennwerten herzustellen, wurden Schwingfestigkeitsversuche

mit Proben durchgeführt, die innerhalb einer Versuchsreihe ein gleiches Gefüge besitzen. Dies wird nach den Schwingfestigkeitsversuchen durch Gefügeuntersuchungen im Bereich der Ermüdungsrisse nachgewiesen. Ein überwiegend perlitisches Gefüge in der Nähe des Bruchs ist in **Abbildung 6** dargestellt.

Bei der Anwendung des Lebensdauerberechnungskonzepts werden den lokal auftretenden Gefügen reale Festigkeitseigenschaften zugewiesen, die dann lokal wirkenden Beanspruchungen zugeordnet werden können. Der Nachweis der Anwendbarkeit der rechnerischen Lebensdauerabschätzung unter schwingender Beanspruchung erfolgt durch eine experimentelle Untersuchung an einem Demonstratorbauteil. Im Ergebnis der Untersuchungen wird ein Werkstoffmodell geschaffen, das über eine genauere Vorhersage der quasi-statischen und zyklischen Eigenschaften eine Lebensdauerabschätzung bereits vor dem Guss von Bauteilen zulässt.

AII4ADI

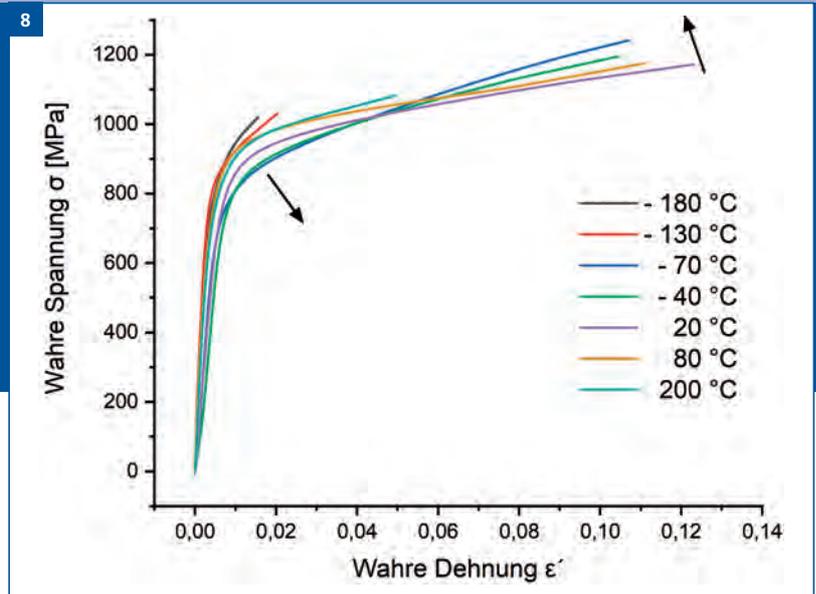
In einem wissenschaftlich-technischen Projekt in Zusammenarbeit mit Industrie- sowie Forschungspartnern wird eine ADI-Datenbank erschaffen, welche die Leistungsfähigkeit von ADI-Bauteilen unter Berücksichtigung einer energie- und materialeffizienten Herstellung und damit größtmöglicher Ressourcenschonung steigern soll.

Abb. 6: Überwiegend perlitische ADI-Schwingfestigkeitsprobe an der Bruchfläche nach dem Versagen.

Abb. 7: ADI-Gefüge nach der Heat Tinting Methode geätzt. weiß = Ferrit, lila/blau = Austenit, beige = Carbide, grau = Graphitkugeln.

Der Einsatz von Legierungselementen, wie Ni, Cu oder Mo, für die Herstellung von Bauteilen unterschiedlicher ADI-Sorten vergrößert das Prozessfenster hinsichtlich einer vollständigen Ausferritisierung, führt jedoch auch zu einer Erhöhung der Materialkosten auf bis zu 150 % und verstärkt unerwünschte Seigerungen. Mit diesen geht ein inhomogenes Gefüge mit lokal unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften einher. In **Abbildung 7** ist ein ausferritisches Gefüge eines ADI mit Seigerungszone dargestellt. Einflüsse weiterer Legierungs- oder auch Spurenelemente auf die Wärmebehandlung sind bisher nur unzureichend untersucht worden. Daher wird in diesem Projekt angestrebt, die Legierungselementgehalte an die Konstruktion und Bauteilanforderungen individuell anzupassen. Über Design of Experiments werden die Einflüsse der Legierungselemente Mangan, Silizium, Molybdän, Kupfer und Nickel einzeln und in Kombination miteinander untersucht. Zusätzlich wird eine genaue Charakterisierung der Phasenumwandlungen und somit der Prozessfenster vorgenom-

Abb. 8: Spannungs-Dehnungskurven von ADI bei unterschiedlichen Belastungstemperaturen. Die Verläufe bei -40 und -70 °C zeigen Werkstoffplastifizierung bei niedrigeren Spannungen als bei Raumtemperatur.



men, die eine Einstellung der anforderungsgerechten ADI-Gefüge erlaubt. Zur Ermittlung der charakteristischen Größen der Phasenumwandlung sollen mittels Dilatometrie ZTU-Diagramme für unterschiedliche Legierungen aus dem DoE erstellt werden, die der Verifizierung der Kinetikmodelle dienen. Simulative Methoden sollen den Gieß-, Erstarrungs- und Wärmebehandlungsprozess vollständig erfassen, um am Ende des Vorhabens eine rein numerische Bauteilbemessung auf Basis lokaler Gefügekennwerte und resultierender Eigenschaften durchführen zu können.

Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Austenitstabilität in ADI

Aus Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) kann durch eine ausferritisierende Wärmebehandlung ADI (Austempered Ductile Iron) erzeugt werden, deren quasi-statische mechanische Eigenschaften denen der konventionellen duktilen Gusseisen weit überlegen sind. Die Matrix dieses Werkstoffs besteht vornehmlich aus nadelförmigem Ferrit und stabilisiertem Restaustenit. In einem Forschungsprojekt wird die durch Zusammensetzung und Prozessparameter eingestellte mikromechanische Stabilität des Restaustenits als ein die mechanischen Eigenschaften entscheidend beeinflussender Faktor untersucht.

Durch eine exakte Einstellung des Verformungsverhaltens sollen er-

zielbare Bruchdehnung und Verfestigungsvermögen stark gesteigert werden. Dies birgt das Potential für die Ausweitung der Anwendungsbereiche von ADI-Bauteilen, beispielsweise im Automobilbereich. In Anlehnung an bainitische Stähle mit einer ähnlichen Zusammensetzung werden Legierungselemente und Wärmebehandlungsparameter variiert und die Proben bei unterschiedlichen Temperaturen geprüft.

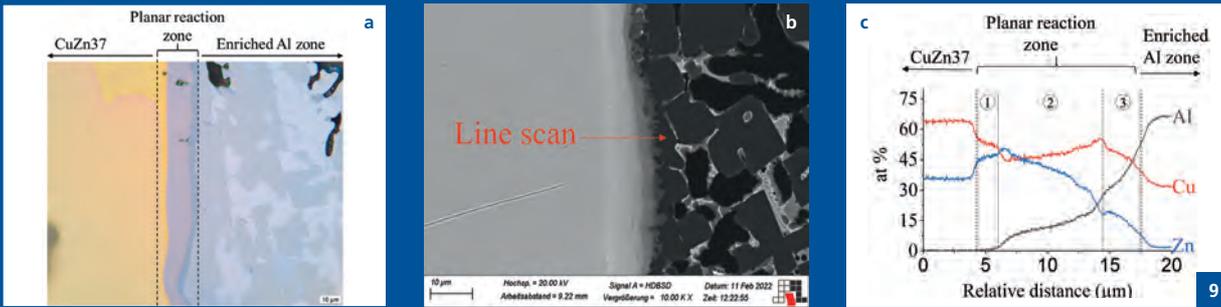
Ziel ist die Erzeugung maximaler Austenitgehalte, die durch die gezielte Einstellung definierter thermodynamischer Stabilität während mechanischer Belastung spannungs- und dehnungsinduziert in Martensit umwandeln. Dieser als umwandlungsinduzierte Plastifizierung (TRIP – transformation induced plasticity) bezeichnete und in speziellen Stählen angewandte Vorgang erlaubt durch große Steigerung der Dehnung und Verfestigung eine bessere Ausnutzung von Bauteilquerschnitten.

Zur Erfassung der Werkstoffeigenschaften wird eine Reihe in dieser Weise in ADI bisher nicht kombiniert angewandter Analysemethoden verwendet. Der Zustand des Austenits wird durch mechanische Prüfung, Röntgen- und Elektronendiffrakto-

metrie charakterisiert, um so die zielgerichtete Einstellung und Prognose seines mechanischen Verhaltens zu ermöglichen. Insbesondere wird erstmals die Stapelfehlerenergie berücksichtigt, die in TRIP- und TWIP-Stählen einen großen Einfluss auf das Verformungsverhalten ausübt und zu dessen genauer Einstellung herangezogen werden kann. Durch die Temperaturabhängigkeit der Stapelfehlerenergie kann in einem von der Zusammensetzung des Austenits abhängigen Temperaturbereich der TRIP-Effekt aktiviert werden. Dies lässt sich etwa in [Abbildung 8](#) an den Spannungs-Dehnungs-Kurven bei -40 °C und -70 °C ablesen, die schon bei niedrigeren Spannungen in eine plastische Verformung übergehen, jedoch höhere Bruchfestigkeiten erreichen als die Kurve bei Raum- oder noch höheren Temperaturen.

Entwicklung von Hybridwerkstoffen

Komplexe industrielle Anforderungen lassen sich gegenwärtig nicht immer durch homogene Werkstofflösungen erfüllen. Vor diesem Hintergrund wurde das Verbundstranggießverfahren zur Herstellung von Hybridwerkstoffen aus Metallen mit unterschiedlichen chemischen und mechanischen Eigenschaften in einem einzigen



Bauteil entwickelt. Vereinfacht wird dazu ein flüssiges Metall über ein anderes, bereits erstarrtes Metall vergossen. Idealerweise bildet sich dabei eine metallurgische Verbindung zwischen den Metallen, was durch hohe Temperaturen befördert und anhand von Prozessparametern gesteuert wird. Wenn die Metalle nicht vollständig ineinander löslich sind, kann es zur Ausscheidung intermetallischer Phasen kommen. Diese bilden sich in der Regel als flächige Schicht entlang oder diskret in der Nähe der Grenzfläche. Im diskreten Fall erfolgt die Erstarrung des geschmolzenen Metalls, welches durch die Auflösung des festen Grundmetalls mit Legierungselementen angereichert wird. Da intermetallische Verbindungen spröder sind als die Grundwerkstoffe, beeinträchtigen sie die Leistung des Hybridbauteils stark. Das genaue Verständnis über Bildung und Wachstum dieser Phasen ist daher von entscheidender Bedeutung für die Herstellung von Verbundwerkstoffen.

Die Gießertechnik der TU Clausthal erforscht die zu Grunde liegenden metallurgischen Phänomene, durch die die Entwicklung von Verbundbauteilen bestimmt wird. Dafür wurde in mehreren bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben die Grenzflächenbildung zwischen Aluminium und Eisen untersucht. Aktuell werden in Zusammenarbeit mit der TU München Untersuchungen an Aluminium-Kupfer- und Aluminium-Messing-Hybridwerkstoffen durchgeführt.

Die Schwerpunkte unserer Analysen sind:

- Charakterisierung der Grenzfläche mittels LOM, REM und EDX-Methoden (Abbildung 9),
- Thermodynamische Berechnungen zum Verständnis der Phasenbildung,
- Untersuchung der Kinetik der Phasenbildung durch Laborexperimente zur Fest-Flüssig-Interdiffusion (Abbildung 10),
- Entwicklung von numerischen Modellen zur Vorhersage der Dicke intermetallischer Schichten.

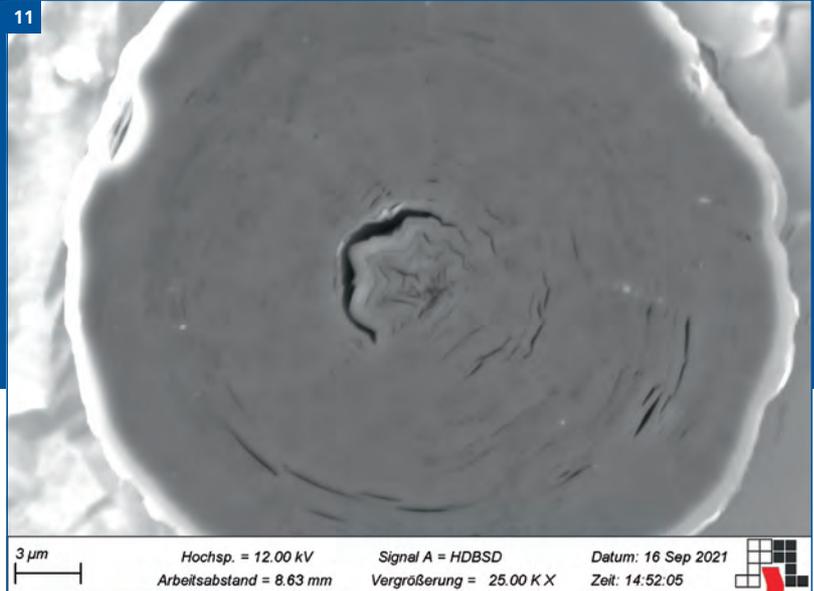
Abb. 9: Charakterisierung von Grenzflächen mittels: a) LOM-Aufnahme der Grenzfläche, b) REM-Aufnahme der Grenzfläche und c) EDX-Linescan.

Gemeinsam gehen wir weiter!
Ein neues interdisziplinäres Projekt zur Untersuchung der Kinetik der Grenzflächenbildung zwischen ungleichen Materialien mit Hilfe der Multiskalensimulation ist gestartet. Eine der größten Herausforderungen bei unserer Methodik zur Entwicklung von Hybridbauteilen ist die Vorhersage der Grenzflächenbildung auf der Grundlage von Material- und Prozessparametern. Insbesondere Datensätze für Diffusionskoeffizienten bei bestimmten Zusammensetzungen sowie bei hohen Temperaturen, die

Abb. 10: Untersuchung der Kinetik der Phasenbildung durch Laborexperimente zur Fest-Flüssig-Interdiffusion: a) Darstellung des Testbereichs und b) Typische Makrostruktur nach dem Experiment.



Abb. 11: Aufnahme einer angeschliffenen Graphitkugel in einer tiefgeätzten GJS Probe.



bei Verbundgussverfahren üblich sind, sind nur begrenzt verfügbar. Um die Vorhersagefähigkeit von uns bereits entwickelter Modelle weiter zu verbessern, startete im November 2022 ein neues Kooperationsprojekt zwischen der Gießertechnik und der Festkörperkinetik an der TU Clausthal sowie dem Zentrum für Simulationswissenschaften Clausthal-Göttingen. Das Hauptziel des Projekts ist die Erstellung und Validierung eines sequenziellen, multiskalierten numerischen Modells zur Simulation des Grenzflächenbildungsmechanismus und zur Vorhersage des Wachstums intermetallischer Schichten zwischen Aluminium und Messing, die durch Fest-Flüssig-Verbindungen hergestellt werden. Dies wird die Möglichkeit bieten, eine optimale Einstellung der Prozessparameter zu ermitteln, um feste Verbindungen in Verbundguss- oder Schweißprozessen in diesen komplexen Materialsystemen zu erreichen. Der mit praktischen Experimenten verbundene Versuchs- und finanzielle Aufwand soll dadurch reduziert werden. Das Projekt konzentriert sich auf die Bestimmung der Reaktionskonstanten an der Grenzfläche und der Diffusionskoeffizienten in jeder intermetallischen Schicht. Da die Diffusionsexperimente umfangreich und zeitaufwendig sind, wird die Änderung der Diffusivität als Funktion der Konzentration durch MD-Simulationen untersucht, was dem Modell ein Vorhersagepotenzial verleiht. Die berechneten Diffusionskoeffizien-

ten werden mit Tracer-Diffusionsexperimenten bestätigt. Außerdem soll das validierte Modell in Zukunft den Kostenaufwand sowie den Umfang experimenteller Diffusionsstudien an anderen Werkstoffsystemen reduzieren.

Erweiterung der metallographischen Analysemöglichkeiten mit neuem REM ZEISS EVO 15

Zur Verbesserung der elektronenmikroskopischen Untersuchungsmöglichkeiten am IMET wurde im vergangenen Jahr ein ZEISS EVO 15 Rasterelektronenmikroskop (REM) beschafft, das das vorhandene Cambridge Camscan 44 ersetzt. Die umfassend modernere Ausstattung stellt einen großen Sprung in Analysefähigkeiten und -qualität dar. REM-typisch sind durch Sekundär- (SE) und Rückstreuerelektronendetektion (BSE) Topographie- und Materialkontrasterfassung möglich. Durch Detailbetrachtung können Proben mit einer Bildauflösung im Nanometerbereich untersucht werden. Durch Zusammenfügen von Einzelbildern können nach automatisierter Messung Aufnahmen mit hunderten Megapixeln erstellt werden, um große Probenbereiche zu untersuchen. Das EVO 15 REM verfügt darüber hinaus durch variable pressure über die Möglich-

keit, Proben mit geringer Leitfähigkeit ohne Bedampfung untersuchen zu können.

Der EDX-Detektor Ultim Max 40 von Oxford Instruments erlaubt in Zusammenarbeit mit den Softwarepaketen AZtecLive Advanced und AZtec LAM (Large Area Mapping) die detaillierte Erfassung und Darstellung der Probenzusammensetzung. Damit ist auch eine automatisierte EDX-Partikelanalyse möglich.

Die softwareseitigen Neuerungen erlauben eine weitgehende Automatisierung langwieriger und ausgedehnter Analysevorgänge. Ein herausragendes Feature ist die in Kombination mit einem ebenfalls neu beschafften, vollmotorisierten ZEISS Axio Imager Z2m-Lichtmikroskop mögliche korrelative Mikroskopie. Dadurch wird die Untersuchung desselben Probenbereichs und Verknüpfung der Ergebnisse von Licht- und Elektronenmikroskopie ermöglicht und vereint so die Stärken der beiden Untersuchungsmethoden. Weiterhin ermöglicht der als jüngste Erweiterung ebenfalls am EVO 15 montierte EBSD-Detektor C-Nano+ von Oxford Instruments die Untersuchung von Proben durch Elektronenrückstreuung. Damit können nun durch die ortsauf-

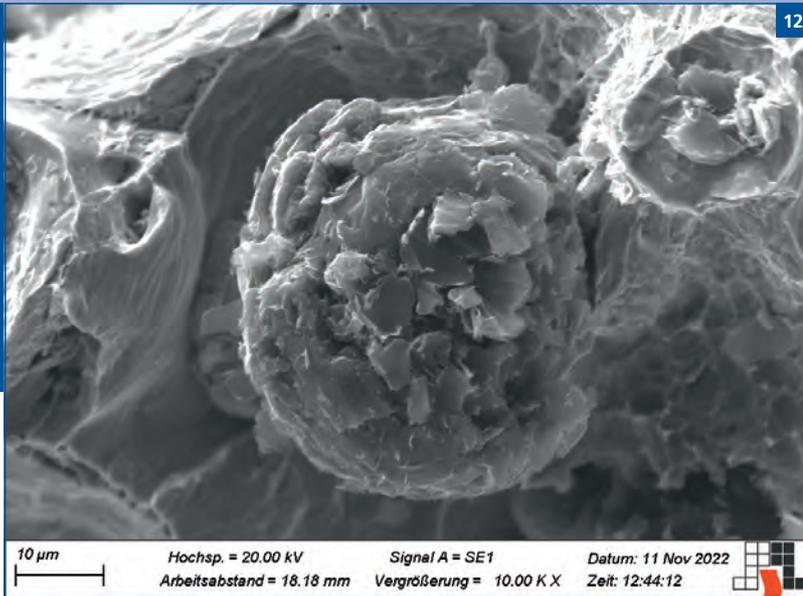


Abb. 12: Oberfläche einer Graphitkugel in einer Bruchfläche von Gusseisen mit Kugelgraphit.

gelöste Messung des Kristallgitters im Nanometerbereich auch die Phasen winzigster Ausscheidungen erfasst sowie Kristallorientierungen, -texturen und Mikrospannungen gemessen werden.

Die Finanzierung von REM, EDX und Lichtmikroskop erfolgte zu gleichen Teilen durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft und das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur. Die **Abbildungen 11 bis 13** zeigen einige rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Gusseisen mit Kugelgraphit.

Ausstattung

Metallographie

- Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit Energiedispersiver Röntgenspektrometrie (EDX) Elektronenrückstreuung (EBSD)
- Stereo- und Auflichtmikroskopie mit Digitaler Bildauswertung
- Halbautomatische Schleif- Und Poliergeräte, Vibrationspolitur, Elektropolitur

Technikum Gießereitechnik

- Mittelfrequenz-Induktionstiegelöfen: 30 kg & 150 kg Eisenguss

- Wärmebehandlungsöfen bis 1600 °C
- Widerstandsbeheizte Schmelzöfen bis 1300 °C
- Thermische Analyse
- Funkenemissionsspektrometer (OES)
- 3-Wellen-Sandmischer mit Verdichtertisch

Werkstoffprüfung

- Zug-Druck-Resonanzprüfmaschine bis 100 kN
- Umformsimulatoren
- Abschreckdilatometer
- Universalprüfmaschine bis 300 kN
- Pendelschlagwerk bis 200 J

Chemische Analytik

- Optische Emissionsspektrometrie mit Induktiv Gekoppeltem Plasma (ICP-OES)
- Verbrennungsanalyse C/S
- Trägergasheissextraktion N/O

Software

- Formfüllungs- und Erstarrungssimulation
- Thermodynamische Modellierung von Legierungen
- Statistische Versuchsplanung (DoE)

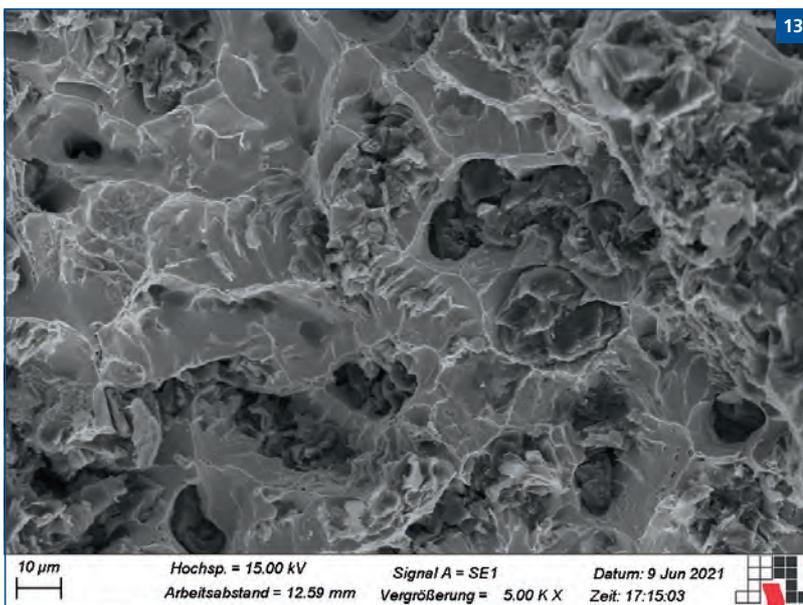


Abb. 13: Aufnahme einer Bruchfläche von Gusseisen mit Kugelgraphit.

Innovative Lösungen für Gießprozesse und Pulverproduktion aus einer Hand

Blue Power Casting Systems aus der Indutherm-Gruppe in Walzbachtal bei Karlsruhe bietet ein weites Spektrum an Anlagen für Gießverfahren mit verlorenen und mit Dauerformen, für die Produktion von erstklassigem Halbzeug, für das Recycling sowie für die Herstellung von hochwertigen Metallpulvern:



Abb. 1: Die beiden Blue Power Angebotschwerpunkte: Gießtechnik und Pulververdüsung (Bild: Riedel/Blue Power).

- Kompakte Vakuum-Druck-Gießanlagen (MC-Serie) für den Einsatz in F&E sowie für den Guss kleinster Teile. Temp. max bis zu 2.000° C.
- Vakuum-Druck-Gießanlagen VC-Serie (Stopfenstangenprinzip) mit Tiegelvolumen von bis zu 25 l. Bis zu 2.000° C
- Vakuum-Druck-Gießanlagen VTC-Serie (Kippgießanlagen) für hoch schmelzende Legierungen wie Stahl, Platin oder Titan.
- Stranggussanlagen (CC/VCC-Serie) für die Produktion von hochwertigen Bändern, Drähten, Rohren. Auch mit Vakuum-Funktion sowie mit Schneide-, Säge- oder Aufrollvorrichtungen.
- Granulieranlagen (GU-Serie) und Micro-Granulieranlagen
- Schmelzanlagen (MU-Serie) und Kippöfen (TF-Serie) bis 28 l Tiegelvolumen

Alle Blue Power-Anlagen sind mit selbst entwickelten Induktionsgeneratoren, mit Programmsteuerung sowie mit umfangreichen Schnittstellen nach Industry 4.0-Standard ausgerüstet. Zahlreiche Blue Power-eigene Technologien sichern bestmögliche Ergebnisse, so z.B. das Blue Power Vibrationssystem oder ausgeklügelte Vakuum-Überdruck-Steuerungen zur optimierten Formfüllung und Oxidationsvermeidung.

Der Feinguss hat Konkurrenz bekommen. Blue Power ist kompetenter Partner auf dem Weg in die Zukunft.

Neue Fertigungstechnologien sollte man nie unterschätzen. Deshalb haben sich Indutherm und Blue Power schon in den Anfangszeiten der Additiven Fertigung mit der Entwicklung von Anlagen zur Herstellung und

Klassierung von hochwertigen Metallpulvern befasst. So können speziell die Kunden aus der Gießereibranche, die ihr Angebot erweitern wollen, umfassend beraten und mit innovativer Technik unterstützt werden.

Da in allen pulverbasierten Verfahren wie SLM, MIM, SLS u.a. der Qualität der Metallpulver elementare Bedeutung zukommt, gleichzeitig die Anforderungen an spezielle Pulverspezifikationen, aber auch an Ausbringungsraten sehr unterschiedlich sind, hat Blue Power ein ganzes Spektrum an Anlagen zur Pulverproduktion im Portfolio:

- AUS Ultraschall-Atomiser – eine extrem kompakt bauende Lösung für die extrem schnelle Produktion kleinerer Mengen an hochreinem Pulver in höchster Sphärizität
- AUG Gas-Atomiser – für die Produktion kleiner bis mittlerer Pulvermengen (0,25 bis 25 l Tiegelvolumen) in sehr hoher Qualität, flexibel einsetzbar dank unterschiedlicher Düsensysteme. Für vielfältigste Legierungen auf Basis von beispielsweise Cu, Au, Ag, Sn oder Zn (Standardversionen), sowie Fe, Co, Ni, Pd oder Pt (Hochtemperaturversionen bis 2.100° C).
- AUW Wasser-Atomiser – für die Herstellung eher unregelmäßig geformter Pulverpartikel, z.B. für Recycling-/Scheide- und Sinterprozesse
- AC Air Classifier – 1- oder 2-stufige Windsichter-Systeme zur präzisen Trennung und Klassierung von Metallpulvern in feine und grobe Pulverfraktionen

Bei allen Verdüsungsanlagen erfolgt das Erschmelzen unter Schutzgas/Va-

Kontakt

Blue Power Casting Systems GmbH
Brettener Str. 32
D-75045 Walzbachtal
Tel.: +49 (0)7203 92180
info@bluepower-casting.com
www.bluepower-casting.com



kuum. Eine hochpräzise Temperatur-/Prozesssteuerung (auch ferngesteuert) sichert reproduzierbare und konstant hohe Pulverqualität. Alle Anlagen sind optimiert für kleinere Chargen und häufigen Wechsel von Legierung oder Partikelgröße ohne Querkontamination (Easy-to-clean-Konzept). Sie

zeichnen sich durch hohe Pulverausbeute und kurze Zykluszeiten aus.

Blue Power Casting Systems bietet darüber hinaus ein umfangreiches DMS-System an. Damit kann nicht nur jeder einzelne Gieß- oder Verdünnungsvorgang überwacht, gesteuert,

Abb. 2: Gieß- und Schmelzanlagen für unterschiedliche Einsatzzwecke (links), Gasverdünnungsanlage (rechts), (Bild: Riedel/Blue Power).

analysiert und dokumentiert werden kann, vielmehr können ganze Produktionsprozesse optimiert werden.

ALLES IM FLUSS.

Stillstand ist Rückschritt. Deshalb sind wir seit über 25 Jahren in unzähligen Forschungsprojekten engagiert und entwickeln zusammen mit namhaften Universitäten und Instituten zukunftsorientierte Fertigungstechnologien in den Bereichen Schmelz- und Gießtechnik sowie Pulvermetallurgie.

Für höchste Produktqualität, für mehr Nachhaltigkeit, Ressourcenschonung, Energieeffizienz – und für Ihre erfolgreiche Arbeit mit unseren Produkten!



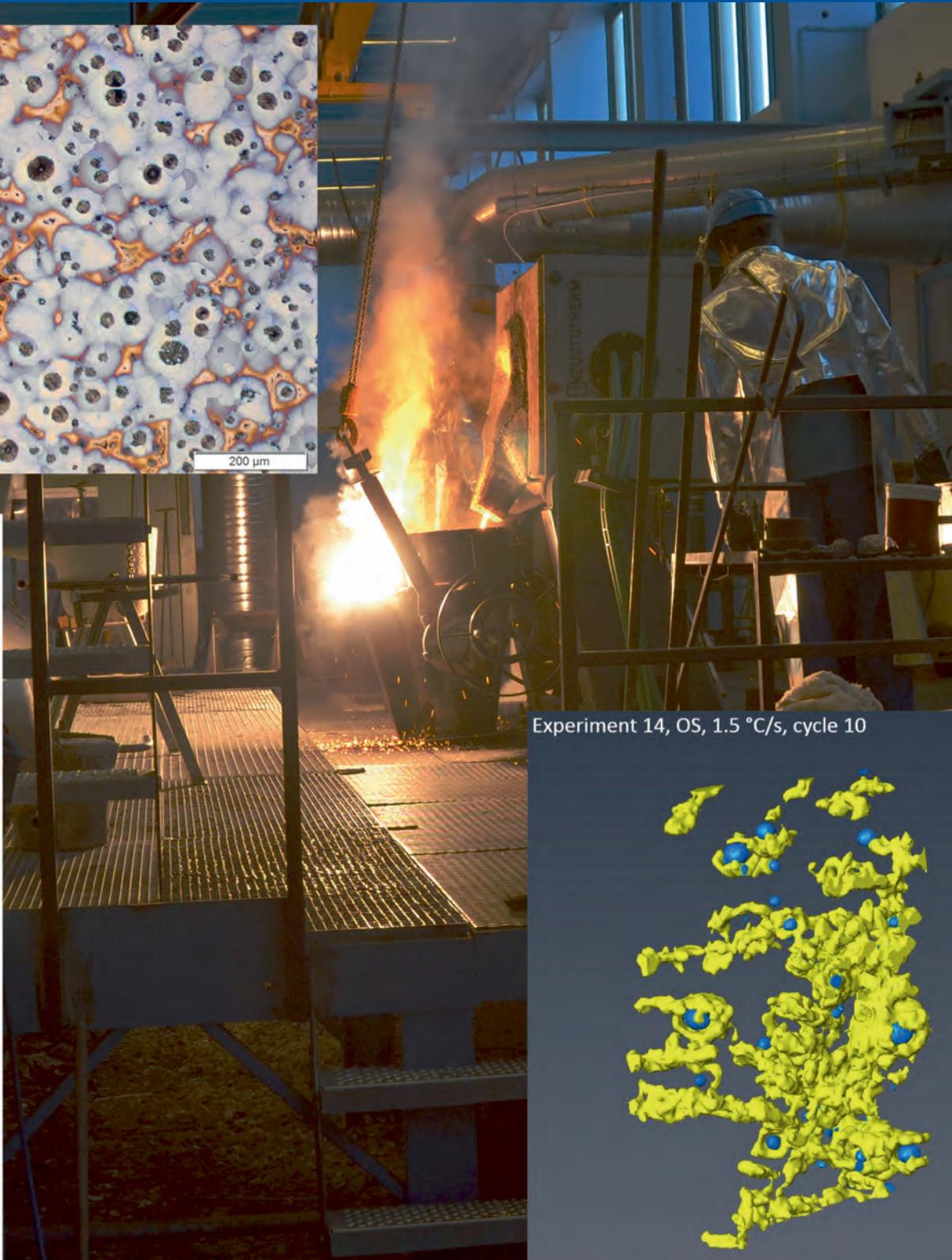
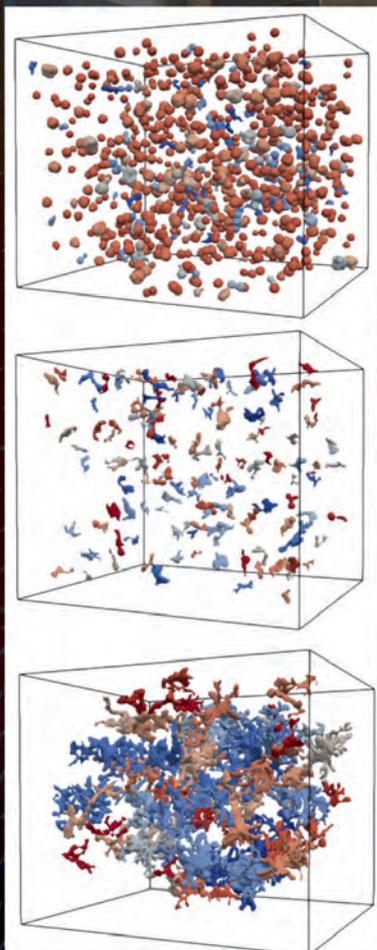
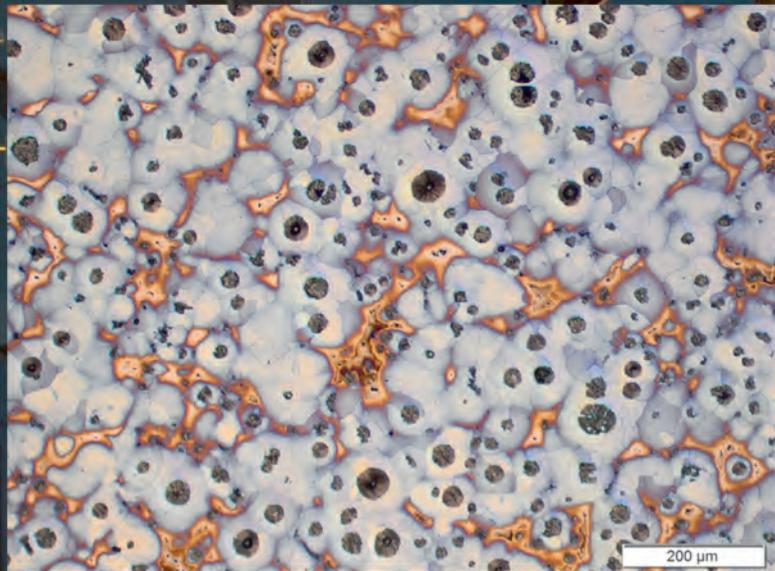
www.bluepower-casting.com



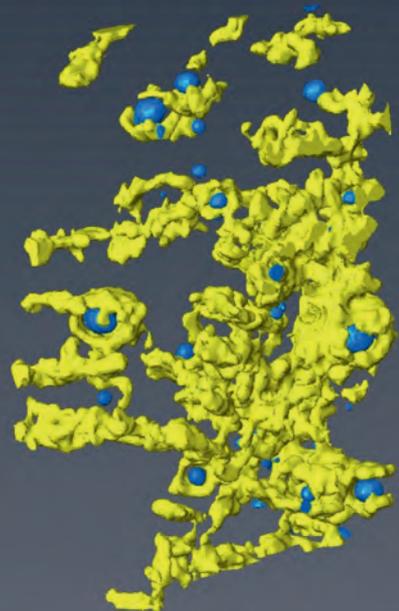


Niels Skat Tiedje
Associate Professor, Ph.D.
Technical University of Denmark

Post Docs:
Tito Andriollo
Chaoling Xu
Mathias Bjerre
Kamran Mohaghegh



Experiment 14, OS, 1.5 °C/s, cycle 10





Technical University
of Denmark

The Technical University of Denmark (DTU) has a long-standing tradition for research and education in foundry technology. We take a multidisciplinary approach to the field of Foundry Technology, combining process studies with metallurgical investigations and modelling of processes and material properties. We use 3D and 4D metrology methods to characterise microstructures in castings and to analyse effects of varying process parameters on the precision of moulds and castings. These methods have proven to be efficient tools to analyse casting processes and to be extremely useful to reveal the inner secrets of materials. In combination with materials- and process modelling tools they give us new, detailed insight into the processes and materials we work with. These investigations are today being used as basis for developing complete through-process models that is the heart of the intelligent solutions in Industry 4.0 digital twins.

4D investigation of solidification

The mechanical properties of cast iron components are largely determined by the microstructure in terms of the size, shape, and distribution of

graphite particles in the matrix. Being able to predict the microstructure at room temperature is an important basis for achieving an optimal component design.

Synchrotron facilities provide X-ray sources with a very high intensity enabling fast imaging of metals and their microstructure. In combination with an environmental cell, this enables in situ imaging of dynamic processes such as solidification or deformation of semi-solid samples shedding light on the basic mechanisms and phenomena of solidification science and provides a strong basis for formulating and validating models in this context.

Such observations provide a unique basis for detailed quantitative studies of spheroidal graphite growth. We can show the effect of the local arrangement of graphite, liquid and austenite on the individual graphite growth patterns and study large ensembles of particles to illuminate both the average and the extreme nodule growth behaviours, see the opening figure.

With the increased use of synchrotron X-rays for in situ experiments on casting-related phenomena we can expect a large improvement in

our understanding which provides a much firmer basis for models and predictions of microstructure formation. [1, 2]

Visualisation of the evolution of compact graphite during solidification

Compact graphite iron (CGI) has been known for more than 40 years and is widely used in the automotive industry. It has its use as engineering material due to its outstanding combination of mechanical and thermal properties. Considering that the size and morphology of graphite in CGI play a key role in determining its properties, it is surprising that very little is known about the evolution process of Compact graphite during the course of solidification.

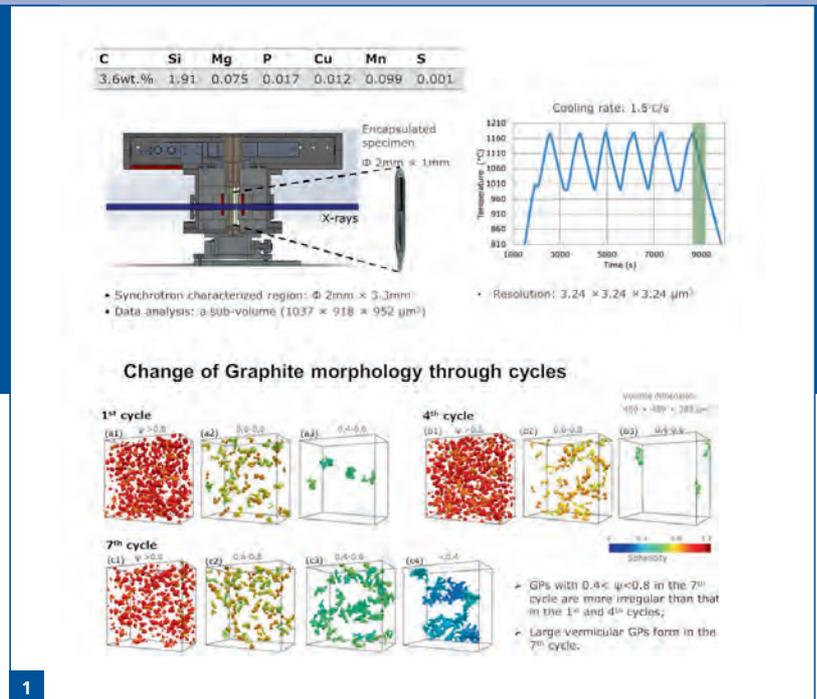
Research in foundry technology and solidification at the Technical University of Denmark.

Kontakt

Technical University of Denmark
Department of Mechanical Engineering
Niels Skat Tiedje, Associate Professor, Ph.D.
Building 425, room 223
D-2800 Kgs. Lyngby, Denmark
Tel.: +45 (0)4525 4719
nsti@mek.dtu.dk
www.mek.dtu.dk

Figure 1: (top) Experimental setup in synchrotron.[1] (bottom) Final distribution of graphite particles segmented by shape, after cyclic remelting. [3]

Growth of graphite is determined by the rejection of solute elements to the liquid, primarily carbon, at the austenite interface. Therefore, the local variations at these interfaces are expected to play an important role in graphite growth. Previous detailed x-ray analysis on the melted cast iron demonstrated that undissolved graphite or carbon-rich clusters exist and diffuse in the melt. [1] Understanding the nucleation and growth processes of graphite during the course of solidification requires in depth dynamic data at local scale. To study this, we conducted high resolution Synchrotron X-Ray investigations where formation of graphite during solidification was studied in real time can be used to investigate the evolution of graphite particles. [3] In an experiment where, a ductile iron sample was subjected to a series of cyclic solidification experiments with repeated melting and solidification it is possible to see gradual degeneration of graphite. During each solidification cycle, 3D images of graphite were recorded so that it is possible to study graphite growth. From one cycle to the next, we could see gradual fading of the Mg treatment and there was gradual formation of compact graphite (and other degenerate forms of graphite). **Figure 1** shows an example of graphite particles in cycles 1, 4 and 7. It is clear that with continued heating, the shape of graphite particles change. However, more detailed studies of the graphite shows that nucleation is



impeded so that the graphite forms at lower temperature and less graphite particles are able to nucleate in the melt. The austenite, on the other hand, nucleates and grows easily creating channel of carbon rich liquid between the dendrites. It is in this carbon rich liquid that graphite grows, as it is shown in **Figure 2**. Since nucleation is difficult due to fading, the graphite grows from already existing graphite particles. The austenite dendrites makes it difficult for the particles to grow as spheres. The result is that small, near nodular particles form irregular branches that take shape after the interdendritic space.

3D Experimental and numerical analysis of the graphite-matrix thermo-mechanical interaction during manufacture of ductile iron

It is well known that ductile iron parts may contain residual stresses, which arise due to the presence of constraints that hinder the free thermal contraction of the material during cooling.

A theoretical model was developed where the internal subdivision of

the nodule into conical sectors was reproduced in detail, see **Fig. 3a**. The model was used to estimate the average thermal contraction of the particle during solid-state cooling. It was found that the nodule contraction is likely 3 to 4 times smaller compared to that of the surrounding matrix, hence confirming the existence of a driving force for the formation of local stresses due to the “squeezing” action of the matrix during cooling. [5]

To investigate the existence of residual stresses at the microscale level, the elastic strain in the ferrite matrix surrounding a few nodules lying beneath the surface of a thin sample was measured using a novel 3D X-ray diffraction technique (**Fig. 3b**). The measurements revealed that local stresses up to approximately half the macroscopic yield strength of ductile iron remain in the microstructure after manufacturing. In addition, numerical simulations allowed clarifying that the conical sectors making up the nodules create residual stress concentrations in the matrix, which correspond to the elastic strain fluctuations seen in **Fig. 1b** when the distance from the nodule is less than ≈ 5-6 microns.

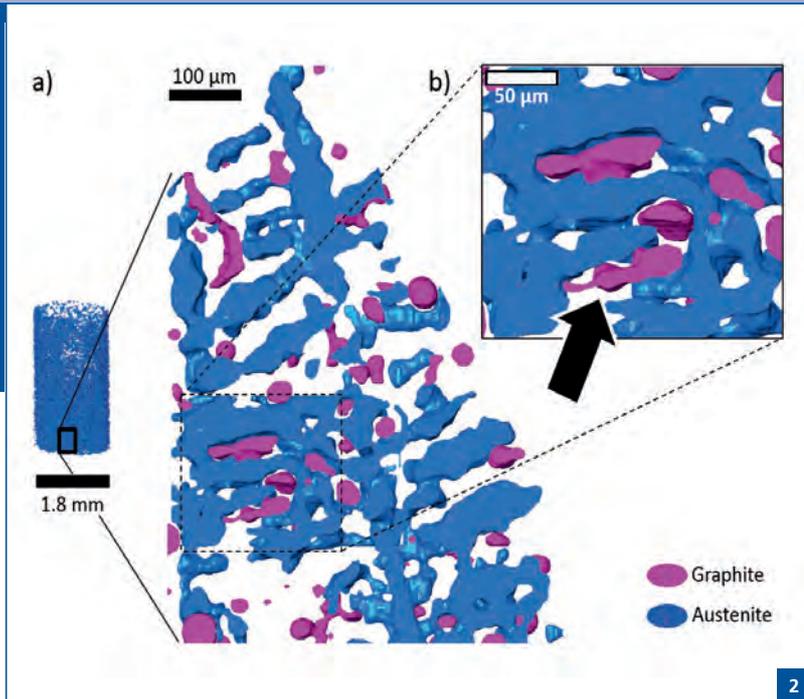


Figure 2: Segmentation of dendrites and graphite showing how graphite grows between dendrites during solidification. [4]

Local deformation of ductile cast iron during loading

The potential of X-ray CT scanning has been enhanced greatly by the advent of Digital Volume Correlation (DVC). DVC allows mapping local strain between two CT scans: one taken before and one taken after mechanical loading. The displacement function is determined by tracking the movement of a characteristic pattern that, for DI, corresponds to the GP distribution. The displacement can be used to derive the strain, meaning that the combination of X-ray CT and DVC provides access to local micro-mechanical information relating to the type of loading/deformation the material is subjected to (see Figure 4). The possibility to couple X-ray CT and DVC with post-mortem metallographic examinations was explored, and used to reveal the connection between the plastic shear bands forming during tensile loading and the complex morphology of the first-to-solidify regions [6].

The displacement and strain fields reconstructed with DVC can be used to validate the models at the level of the microstructure, which is highly

valuable since the X-ray CT data allows setting up models where the real microstructure can be fully resolved. These two facts mean that it is possible to setup numerical models with superior accuracy and predictive power compared to the idealized unit cell models that have traditionally been used to study the micro-mechanics of DI in the past. An example of this is given in Figure 5 where the 3D reconstruction of a fatigue crack that grows by linking the GPs is depicted. The reconstruction, obtained by segmenting the DVC data, was used to setup a finite element model that unveiled a correlation between the local crack growth direction – which controls the crack roughness – and

the predicted micro-mechanical fields developing in between the GPs.

Design of metal powders for 3D printing – from scrap to resource, REPOWDER

The introduction of additive manufacturing (AM) in the form of 3D printing for fast net-shape production of metallic components has revolutionized and revitalized metals research during recent years. However, far too little focus has been devoted to the powders, which are the raw material in the printing process; this in spite of its critical importance for the properties and performance of the printed components. Two essential issues that are addressed in the REPOWDER project are:

Figure 3: (a) Internal structure of a nodule. (b) Elastic strain measured close to a nodule.

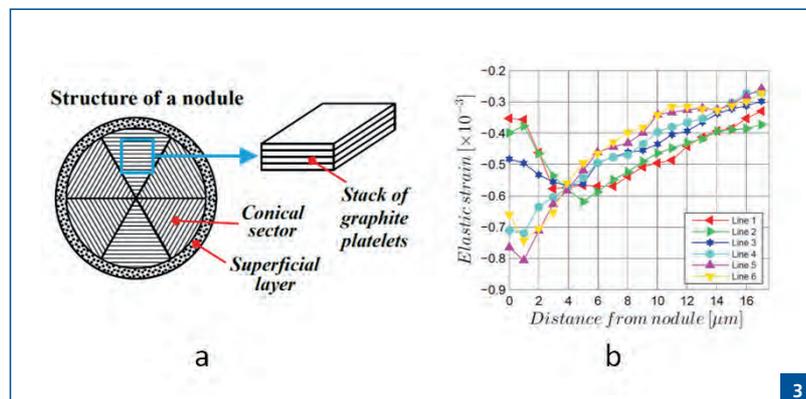
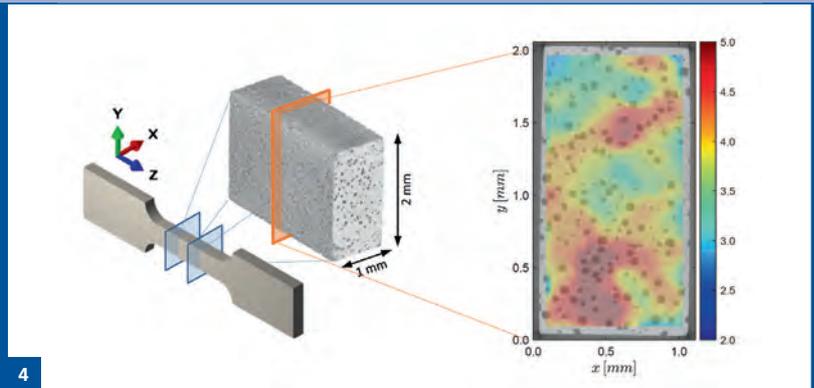


Figure 4: Example of combined use of X-ray CT and DVC. Equivalent strain (in %) over the central cross-section of a tensile DI specimen subjected to 4% macroscopic deformation, superimposed onto the CT scan of the microstructure. Adapted from. [7]



4

- AM uses powders designed for conventional processing and not targeted for the fast heating and cooling rates that are inherent to AM. Therefore, the printed parts are prone to cracking, have anisotropic properties depending on print direction and may contain undesired phases.
- The powders for AM are produced from virgin material drawing unnecessarily on our limited natural resources such as metal ores and energy and keeping production costs high.

The project's first aim is to develop new powders with improved perfor-

mance resulting in printed parts with more uniform and predictive properties, less residual stress and lower susceptibility to cracking than the existing ones. Focus will be on optimizing powder specifications; including chemical composition of one of the most commonly used materials: stainless steel, type 316L.

The second main aim is to quantify available stainless steel scrap resources and establish how they can best be made available for AM, including modifying and optimizing their composition. We will use this information to classify available scrap with regard to quality and quantity and document that high quality powders can be made from recycled steel.

For the project, we have built a gas atomising unit that is able to produce laboratory size batches of powders of custom-made alloys. We have also renovated our laboratories and made a new section specially designed for

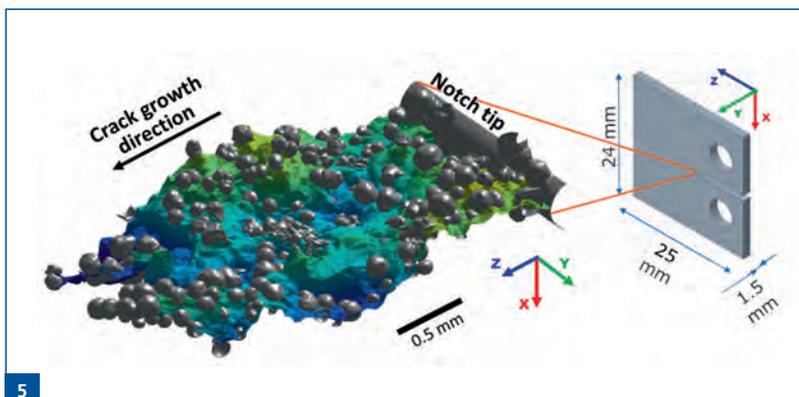
characterisation and handling of metal powders.

Figure 6 shows an example of powder particles and size distribution of 316L stainless steel used in the Laser Powder Bed Fusion process. The figure also shows the gas atomisation process by which the powders are made in our laboratory.

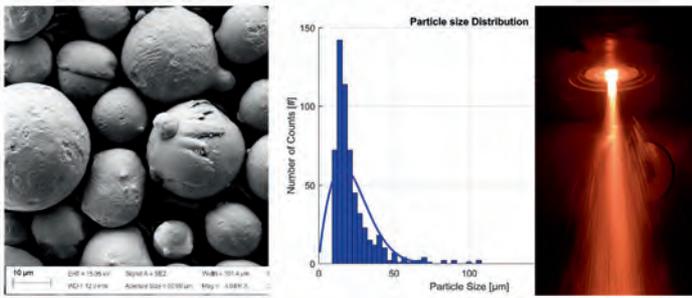
References

- [1] M.A. Azeem, M.K. Bjerre, R.C. Atwood, N. Tiedje, P.D. Lee, Synchrotron quantification of graphite nodule evolution during the solidification of cast iron, *Acta Mater.* 155 (2018) 393–401. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.06.007>.
- [2] T. Andriollo, C. Xu, Y. Zhang, N.S. Tiedje, J. Hattel, Recent trends in X ray based characterization of nodular cast iron, *Mater. Des. Process. Commun.* (2020). <https://doi.org/10.1002/mdp2.212>.
- [3] C. Xu, T. Wigger, M.A. Azeem, T. Andriollo, S. Fæster, S.J. Clark, Z. Gong, R. Atwood, J.-C. Grivel, J.H. Hattel, P.D. Lee, N.S. Tiedje, Unraveling compacted graphite evolution during solidification of cast iron using in-situ synchrotron X-ray tomography, *Carbon* N. Y. 184 (2021) 799–810. <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2021.08.069>.
- [4] N.S. Tiedje, C.L. Xu, T. Andriollo, T. Wigger, M. Azeem, J.H. Hat-

Figure 5: DVC-based reconstruction of a fatigue crack that grows by linking the graphite particles (in gray) in a compact tension specimen. The crack color is proportional to the distance from the ideal crack propagation plane that is perpendicular to the X-axis. Adapted from. [8]



5



6

Figure 6: (left) Powder particles of 316L stainless steel. (Centre) a size distribution for powders used in the LPBF-process. (right) Gas atomisation of 316L stainless steel in our laboratory gas atomiser.

- tel, P.D. Lee, An in-situ study of formation of compact graphite during solidification of cast iron using X ray tomography and radiography, in: 12th Int. Symp. Sci. Process. Cast Iron, Muroran city in Hokkaido, 2021.
- [5] Y.B. Zhang, T. Andriollo, S. Fæster, R. Barabash, R. Xu, N. Tiedje, J. Thorborg, J. Hattel, D. Juul Jensen, N. Hansen, Microstructure and residual elastic strain at graphite nodules in ductile cast iron analyzed by synchrotron X-ray microdiffraction, *Acta Mater.* 167 (2019) 221–230. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.01.038>.
- [6] C.L. Xu, T. Andriollo, Y.B. Zhang, J.C. Hernando, J. Hattel, N. Tiedje, Micromechanical impact of solidification regions in ductile iron revealed via a 3D strain partitioning analysis method, *Scr. Mater.* 178 (2020) 463–467. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.12.018>.
- [7] T. Andriollo, Y.B. Zhang, S. Fæster, J. Thorborg, J. Hattel, Impact of micro-scale residual stress on in-situ tensile testing of ductile cast iron: Digital volume correlation vs. model with fully resolved microstructure vs. periodic unit cell, *J. Mech. Phys. Solids.* 125 (2019) 714–735. <https://doi.org/10.1016/J.JMPS.2019.01.021>.
- [8] T. Andriollo, Y. Zhang, S. Fæster, V. Kouznetsova, Analysis of the correlation between micro-mechanical fields and fatigue crack propagation path in nodular cast iron, *Acta Mater.* 188 (2020) 302–314. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.02.026>.
- [9] K. Mohaghegh, S. Yazdanbakhsh, N. Tiedje, L. De Chiffre, Traceability of optical length measurements on sand surfaces, in: Proc. 16th Int. Conf. Eur. Soc. Precis. Eng. Nanotechnology, EUSPEN 2016, 2016.

Gussteile-Aufbereitung:

**Wir servieren
nur feinstes Material!**



ERDWICH
... SHREDDING UNLIMITED ...



- Exorbitante Volumenreduktion
- Output wird schüttfähig
- Deutliche Verringerung des Transportaufwandes
- Einsparung wertvoller Produktions-/ Lagerflächen

**Besuchen Sie uns
auf der GIFA!**
Halle 16 | Stand 16E25

IM FOKUS



Gießereitechnik

AKADEMISCHE INTERESSENSGEMEINSCHAFT GIESSEREITECHNIK

**Ingenieur
wissenschaften**

Anfragen zur kostenfreien Übersendung von Belegexemplaren
oder zwecks redaktioneller Mitarbeit richten Sie bitte an

Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV)
Finkenstraße 10 · 68623 Lampertheim · Telefon 06206 939-0
info@alphapublic.de · www.institut-wv.de



Perfekte Entsandungsergebnisse mithilfe digitaler Prozessüberwachung

Wir von Rösler sind seit Jahrzehnten ein starker Partner für die Gießereiindustrie. Mit unseren Rösler Smart Solutions heben wir diese Partnerschaft auf ein neues Level. Etwa beim Putzstrahlen.

Dieses Verfahren ist maßgeblich von den eingestellten Parametern an der Strahlanlage abhängig. Eine verantwortungsvolle Aufgabe, die in der Regel durch Fachpersonal durchgeführt wird. Künftig unterstützt Sie unsere RSS-Software bei dieser Aufgabe: Die erzielte Qualität der zu reinigenden Teile steuern und überwachen wir permanent mithilfe unseres selbstregulierenden Rösler PowerLine Valve.

In einem neu entwickelten Regelkreislauf haben wir permanent die Abwurfgeschwindigkeit und die Strahlmitteldurchsatzmenge der Anlage im Blick und zeichnen diese rückverfolgbar auf. Gleichzeitig werden die Strahlturbinen durch diesen

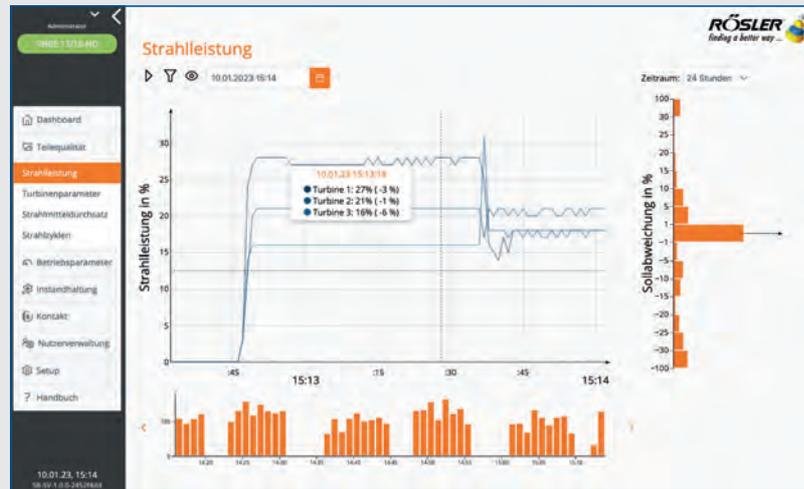


Abb. 1: Rösler Smart Solutions Software mit Strahlleistungsdiagramm und Sollwertabweichung. Fotos: Rösler Oberflächentechnik GmbH

Regelkreislauf immer am idealen und wirtschaftlichsten Betriebspunkt gehalten. Hierdurch sichern unsere Rösler Smart Solutions Ihnen den Erfolg. Profitieren auch Sie von einem gleichbleibend guten Entsandungsergebnis im Strahlprozess und arbeiten Sie mit unseren digitalen Lösungen wirtschaftlicher, ressourcenschonender und schneller.

Kontakt

Rösler Oberflächentechnik GmbH
 Vorstadt 1
 D-96190 Untermerzbach
 Ansprechpartner: Marc Eckstein
 Tel.: +49 (0)9533 924-710
 m.eckstein@rosler.com
www.rosler.com

PROFESSIONELLE OBERFLÄCHENBEARBEITUNG FÜR DIE GIEßEREIINDUSTRIE

GIFA
 Düsseldorf
 12.06.-16.06.2023
 Halle 16 - Stand 16C10



Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Martin Fehlbier

Universität Kassel
Fachbereich Maschinenbau
Institut für Produktionstechnik und Logistik
Lehrstuhl/Fachgebiet Gießereitechnik – GTK



Abb. 1: Metakushalle – Gießtechnikum des GTK in Baunatal. Von links nach rechts: Bühler 1.400t Kaltkammer Druckgießanlage mit Rheometal-Anlage, Frech Mg-Warmkammer Druckgießzelle 220 t, Yizumi Mg-Thixomoldinganlage 1.250 t, ExOne S-Max Pro 3D-Sanddrucker für anorganische Formen und Kerne.



GTK  **GIESSEREI
Technik Kassel**
Zentrum für Gussleichtbau und Konstruktion

Modernes GTK-Gießtechnikum konnte durch einen 3D Formstoffdrucker und eine Rheometal-Anlage erweitert werden

Zum Teil deutlicher Rückgang von Studienanfängern im Bereich Ingenieurwissenschaften / Maschinenbau – aber Ingenieure sind nicht Teil des Problems sondern Teil der Lösung!

An vielen Universitäten sind die Einschreibezahlen im Bereich Ingenieurwissenschaften / Maschinenbau deutlich rückläufig, teilweise um bis zu 50 %, mancherorts sogar noch darüber. Wenn man über die Ursachen spekuliert, so werden neben der Corona-Krise, wo die Unis über Monate keinen Präsenzunterricht hatten und das soziale Studentenleben somit auf einem Nullpunkt angelangt war, auch immer wieder die Schlagworte wie Klimawandel/Klimakatastrophe oder die (Automobil-) Industrie als Verursacher von Schadstoffemissionen (Dieselgate-Skandal) genannt, was zu Bewegungen wie „Fridays for Future“ oder „Last Generation“ mit Protesten z.B. durch Ankleben auf Straßen geführt hat. Faktisch gesehen haben wir es aber auch mit demographischen Themen und dem Geburtenrückgang zu tun. Viele Menschen verspüren eine zunehmende Technikskepsis oder sogar Technikfeindlichkeit in den öffentlichen Medien. Die Berichterstattungen zeichnen häufig ein eher düsteres Bild und rufen uns

zur Änderung unserer bisherigen Lebensgewohnheiten und insbesondere zur Abkehr von Kohle, Gas, Öl und Atomstrom und zur Hinwendung zu erneuerbaren Energien aus Windkraft und Solar auf, um CO₂-Ziele zu erreichen und die drohende Erderwärmung zu begrenzen. Dieser gesellschaftliche Wandel und die damit ungewisse Zukunft mag gerade junge Menschen verunsichern und dazu führen, dass sie sich von den klassischen Technikwissenschaften vermehrt abwenden und Informatik-Studiengänge oder vermeintlich „weicheren“ oder auch „leichteren“ Studienrichtungen, z.B. aus den Sozialwissenschaften, den Vorzug geben. Auch der vieldiskutierte und sich ausbreitende Fachkräftemangel basiert auf ähnlichen Themen.

Wie kann man diese Entwicklung ändern und gegensteuern?

Vordringlich scheint zu sein, unser Image in der Öffentlichkeit schnellstmöglich zu wandeln. Technik- und Ingenieurwissenschaften sind nicht Teil des Problems, und auch nicht die sogenannte Old-Economy, sondern Teil der Lösung. Natürlich brauchen wir zukünftig vermehrt IT-/KI-/CAx-Experten, etc. aber nicht nur, wie manche bekannten Persönlichkeiten aus der Wirtschaft behaupten.

Werkstoffe und Verfahren werden auch zukünftig immer benötigt werden, beides eben. Anstelle von Resignation und dem Schüren von Zukunftsängsten, zum Teil auch in Kombination mit einseitiger Berichterstattung und einseitigen Diskussionen, braucht es neben entsprechenden politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen eine neue, offen gestaltete Aufbruchstimmung in Deutschland, die anstehenden Herausforderungen angehen und lösen zu wollen. Und moderne Technik ist da ein zentraler Baustein. Hierzu bietet der Maschinenbau, die Werkstoff- und Verfahrenstechnik und eben auch die Gießereitechnik ein nahezu unbegrenztes, quasi schon schöpferisches Kreativitäts-

Kontakt

Universität Kassel
Lehrstuhl für Gießereitechnik – GTK
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier
Kurt-Wolters-Straße 3
D-34125 Kassel
Tel.: +49 (0)561 804-7596
sekretariat-gtk@uni-kassel.de
www.gtk.uni-kassel.de



Abb. 2: Besuch der Kasseler Studenten auf der Euroguss 2022, Stand Magma Gießsimulation (Hr. Rockmann).

2

Innovations- und Umsetzungspotential, dass weiter erschlossen werden will. Der jungen Generation ist zu vermitteln, dass sie mit einem Technikstudium den Klimawandel und ihre eigene Zukunft aktiv mitgestalten kann. Dies und die sich bietenden Chancen muss der nachfolgenden Generation stets neu vermittelt werden. Dazu geben sich die Professoren für Gießereitechnik und des AkaGuss an den verschiedenen Hochschulstandorten alle erdenkliche Mühe, sind innovativ und kreativ in Forschung und Lehre sowie bei vielfältigen Angeboten für die Studierenden, u.a. auch Exkursionen und Kongresse und suchen dabei den notwendigen Zusammenschluss und die Kooperation mit der Industrie in Forschung und Drittmittelakquise.

Lehrstuhl für Gießereitechnik an der Universität Kassel

Der Lehrstuhl für Gießereitechnik GTK der Universität Kassel verknüpft die praxisnahe Forschung und Lehre mit der Erforschung von Grundlagen sowie Simulation und Konstruktion. Das Fachgebiet Gießereitechnik zählt zum Fachbereich Maschinenbau und ist dort dem „Institut für Produktionstechnik und Logistik“ zugeordnet.

Der Schwerpunkt der wissenschaftlichen Ausrichtung in Forschung und Lehre liegt auf dem Gebiet des innovativen Gussleichtbaus mit einem zusätzlichen konstruktiven Aspekt. Hierzu zählen die Grundlagen der

Erstarrung und Gefügebildung, die Charakterisierung von Material-, Prozess- und Gussteileigenschaften, die zielgerichtete Entwicklung neuer Leichtbaugusswerkstoffe und Anwendungen sowie neuer energieeffizienter Gieß- und Fertigungstechnologien.

Neben der klassischen Gießereitechnik sollen somit auch die konstruktive Bauteilauslegung, die Prozesssimulation bis hin zur Versagenssimulation im Einsatz (nicht-lineare FEM-Berechnungen, Belastungskollektive mit Temperatureinfluss, Vorhersage Werkstoff- und Bauteilschädigung, Lebensdauer, etc.) mittels geeigneter CAD und Simulationstechniken auf neue Bauteile und Prozesse in Forschung und Lehre integriert und angewendet werden. Zudem steht die Betrachtung der Energie- und Ressourceneffizienz in den Prozessen im Vordergrund stellt eine stets zu optimierende Zielgröße dar.

Seit der Gründung des Fachgebiets für Gießereitechnik verbindet der Lehrstuhlinhaber Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier mit aktuell 20 Mitarbeitern die universitäre Forschung und Lehre bewusst mit den Anforderungen der Industrie hinsichtlich einer praxisnahen Ausbildung im Umfeld einer kompatiblen Anlagenausstattung im industrieähnlichen Maßstab. Durch eine ideale Kombination der wissenschaftlichen Lehre mit aktuellen, sowohl grundlagenorientierten als auch industriell ausgerichteten

Forschungsprojekten erhalten die Studenten eine in Theorie und Praxis gleichermaßen fundierte Ingenieurausbildung. Eine hochmoderne analytische Labor- und Anlagenausstattung gepaart mit modernster Simulations- und Konstruktionstechnik sowie engagierten Mitarbeitern bilden die Grundlage zur Abwicklung erfolgreicher, auch international besetzter Forschungsprojekte mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie.

Im Bereich der Lehre bietet das Fachgebiet die Grundlagenvorlesungen „Fertigungstechnik 2“ und „Konstruktionstechnik 1“ an. Ziel ist es den Studenten das notwendige Basiswissen über den Fertigungsprozess Gießen, die Auslegung diverser Maschinenelemente sowie grundlegende 3D Konstruktionsmethoden zu vermitteln und sie für die vertiefenden Gießereitechnik Vorlesungen zu begeistern. Zu diesen vertiefenden Vorlesungen zählen:

- Gießereitechnik I: Grundlagen – Automobil- und Fahrzeugguss – Gussleichtbau
- Gießereitechnik II: Maschinen- und Anlagenguss, Formstoffe, Sonderverfahren
- Gussgerechtes Konstruieren, virtuelle Produkt – und Prozessentwicklung
- Numerische Simulation gießtechnologischer Prozesse für Leichtbauanwendungen



Abb. 3: Besuch der Kasseler Studenten auf der Euroguss 2022, Stand Nematik AI-Struktur-guss (Hr. Dr. Hennings).

3

■ Modernes Druckgießen im Kontext von Industrie 4.0, Smart Technologies und Digitalisierung sowie praktischer Anwendung (Dr. Norbert Erhard)

Fachvorträge aus der Industrie sowie die aktive Teilnahme von Studentengruppen an den Veranstaltungen des VDG, wie dem deutschen Gießertag, gemeinsame Messebesuche (Euroguss, GIFA) oder die Teilnahme an der VDI-Fachtagung „Gießen von Fahrwerks- und Karosserieteilen“, bei der Prof. Fehlbiel der wissenschaftliche Leiter ist, runden das Angebot für Studierende an der Universität Kassel ab. In Qualifizierungsarbeiten (Semester-, Bachelor-, Masterarbeiten) beschäftigen sich Studenten am Fachgebiet oder in bilateraler Zusammenarbeit mit der Industrie an aktuellen Forschungsprojekten und zukünftigen Fragestellungen.

Das GTK verfügt über eine industriennahe, hochmoderne Labor- und Anlagenausstattung, **Abb. 1**. Das Simulationslabor ist mit modernen Workstations und aktueller CAD-Software, wie Catia, ProE oder NX ausgestattet. Mit den CAE-Tools Abaqus und Tosca werden strukturelle Aufgaben bearbeitet, wie nicht-lineare Festigkeitsberechnungen oder Topologieoptimierungen. Unerlässlich sind zudem die speziellen Gießereianwendungen, wie Magma und Flow3D oder die Open-Source-Software für

numerische Strömungsaufgaben OpenFoam. Je nach Forschungsprojekt sind diverse Softwarelösungen wie JMatPro, MSC ADAMS, KISSsoft, Matlab oder Labview verfügbar.

Das Technikum des GTK am Standort Baunatal, direkt vor den Toren des Volkswagenwerks Kassel, bietet eine hervorragende Infrastruktur mit einem 12,5 t Hallenkran sowie Labor- und Büroflächen. Neben dem Metallografielabor ist eine Junker Mittelfrequenz-Schmelzanlage, mehrere Nabertherm Laborschmelzöfen und Wärmebehandlungsöfen, ein Eirich Mischer für die Sandaufbereitung, eine mechanische Werkstatt sowie genügend Platz für Versuchsstände vorhanden.

Zu den Herzstücken des Maschinenparks am GTK gehören zwei moderne Druckgießmaschinen und eine Thixomolding-Anlage. Diese unterstreichen den Anspruch des GTK einer universitären und industriennahen Forschung und Ausbildung sowie als eine der führenden Forschungsinstitutionen im Bereich Druckguss. Durch ihre Größe und Ausstattung bilden diese Maschinen ein perfektes Bindeglied zwischen industriellen Fragestellungen und universitärer Grundlagenforschung.

Als weiteres Highlight konnten Ende des vergangenen Jahres gleich zwei REACT-EU Projekte „EU NextGeneration“ vom GTK in einem Gesamtvolu-

men von über 2 Millionen Euro gewonnen werden. Mit diesen Mitteln wurde zum einen eine neue Rheogussanlage* der Fa. Comptech aus Schweden beschafft, siehe Titelbild, sowie ein 3D-Formstoffdrucker* der Fa. ExOne zur Herstellung von anorganisch gebundenen Sandformen und -kernen. Auf die neuen Geräte und weitere Aktivitäten am GTK auch mit Studenten wird im Nachgang näher eingegangen

Besuch der Kasseler Studenten auf der Euroguss

Nachdem die Coronapandemie gefühlt nun endlich vorbei ist und mittlerweile auch größere Veranstaltungen standardmäßig wieder wie gewohnt in Präsenz stattfinden, kann sich die Gießereibranche in diesem Jahr auf die GIFA in Düsseldorf freuen. Aber auch schon im Juni 2022 fand die Euroguss-Druckgussmesse in Nürnberg nach einer längeren Pause wieder statt. Selbstverständlich war das GTK mit einem eigenen Messestand auch vor Ort und organisierte außerdem für interessierte Studenten eine eintägige Exkursion zur Messe. Der Messebesuch beinhaltete einen von Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbiel geleiteten Rundgang mit Standbesuchen bei den Unternehmen MAGMA, Nematik, Bühler und bei dem Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie, wobei die Studenten von den engagierten Standbetreuern über aktuelle Trends und Entwicklungen in der Gießereiindustrie informiert



Abb. 4: GTK-Stand auf der Euroguss 2022

wurden, **Abb. 2 – 4**. Außerdem stand der Besuch des 21. Druckgusstages auf dem Tagesplan und natürlich hatten die Teilnehmer auch genügend Zeit das weitläufige Messegelände und die vertretenen Firmen in Eigenregie zu erkunden. Vor der Heimreise konnte der gelungene und ereignisreiche Tag noch in gemütlicher Runde mit Snacks und Getränken am Messestand von Yizumi reflektiert werden. Der gelungene Ausflug ermöglichte den Studenten einen spannenden Einblick in die Druckgussbranche und das Feedback war sehr positiv. Das Fachgebiet für Gießereitechnik der Universität Kassel bedankt sich recht herzlich bei allen Unternehmen und Messestandbetreuern, die bei dem Messerundgang der Studierendenrunde mitgewirkt haben.

Abb. 5: Projekt-Meeting „Industrieförderkreis Gießereitechnik – innovativer Gussleichtbau“ im Gießtechnikum Metakushalle des GTK.



Chancen und Möglichkeiten der neuen Rheometal-Technologie am GTK: neues Forschungsprojekt des „Industrieförderkreises Gießereitechnik – innovativer Gussleichtbau“

Der „Industrieförderkreis Gießereitechnik – innovativer Gussleichtbau“ ist ein vom Fachgebiet Gießereitechnik der Universität Kassel ins Leben gerufenes Industriekonsortium mit aktuell ca. 25 Mitgliedern und hat das Ziel gemeinsam entwickelte, übergreifende Forschungsprojekte zu finanzieren, den interdisziplinären Informations- und Interessens Austausch zu fördern und die Kooperation zwischen den Mitgliedern zu stärken. Darüber hinaus wird die Etablierung exzellenter Nachwuchsförderung von der Forschungsgemeinschaft mit hohem Interesse verfolgt. Jedes Jahr finden mehrere regelmäßige Treffen statt, bei denen über das aktuell geförderte Forschungsprojekt und mög-

liche zukünftige Forschungsthemen diskutiert wird, **Abb. 5**.

Das letzte Großprojekt, das der Förderkreis ermöglicht hat, „Spraying-on-Demand“, fand Ende 2022 seinen Abschluss und hatte das Ziel einen bedarfsgerechten Sprühprozess auf Basis eines Infrarot-Messsystems zu entwickeln. Dazu wurde eine KI gestützte Regelung des Formsprühprozesses entwickelt, die auf Basis der mittels Infrarotkameras erfassten Oberflächentemperaturen des Druckgusswerkzeugs, sowie weiterer Maschinendaten und Daten der Peripheriegeräte arbeitet. Für 2023 steht bereits das nächste Forschungsprojekt mit dem Titel „Chancen und Möglichkeiten der Rheometal-Technologie“ in den Startlöchern. Kern des Projekts ist die Untersuchung des Verarbeitungsprozesses von teilerstarter Schmelze unter Verwendung der neuen Rheometal-Anlage* des schwedischen Herstellers „Comptech AB“, siehe Titelbild, die sich seit Ende 2022 in den hochmodernen Maschinenpark des GTK-Gießereitechnikums einreicht. Die Anlage ist durch das REACT-EU Programm der Europäischen Union gefördert und ist zum Gießen von teilflüssigen Aluminiumlegierungen in die Druckgießzelle Bühler Carat 140 am GTK integriert worden. Das für den Prozess benötigte teilflüssige Vormaterial wird dabei direkt in der Druckgießzelle vollautomatisiert über einen Nebenprozessschritt hergestellt, was eine hohe Prozessstabilität gewährleistet.



6

Der Aufbau besteht aus einer Rühr-einheit, einem Eigenmaterial-Dosier-system, einem Dosierroboter und einem elektrischen Warmhalteofen der Fa. „Stotek“ mit einem Fassungsvermögen von ca. 1.200 kg Aluminiumschmelze. Die Anlage ist für variable Schussgewichte zwischen drei und zwölf Kilogramm ausgelegt. Der Rheometal-Prozess bietet einige Vorteile gegenüber dem konventionellen Druckgießprozess. Ein wichtiger Grund hierfür ist die globulitische Struktur des Gießmaterials im Vergleich zur dendritischen Struktur beim konventionellen Gießen und die daraus resultierende geringere Scherfestigkeit des Gießmaterials, [Abb. 6](#). Beispielweise können beim Rheometal-Prozess geringere Formfüllgeschwindigkeiten mit laminarer Strömung erzielt werden und gleichzeitig erhöhte Fließwege bei geringerer Schwindung erreicht werden. Des Weiteren ist die Verarbeitung siliziumarmer Aluminiumlegierungen möglich.

Neuer 3D-Formstoffdrucker* von ExOne mit anorganischem Binder

Ebenfalls seit Ende 2022 neu im GTK-Gießereitechnikum und durch das REACT-EU Programm gefördert ist der 3D-Formstoffdrucker „S-Max Pro“ von der Fa. ExOne. Dieser arbeitet nach dem innovativen Binder-Jetting-Verfahren und dient der additiven Fertigung von Sandgussformen bzw. -kernen mit anorganischen Bindern. Die 1800 x 1400 x 400 mm große Jobbox (Raum für Druckprozess) liefert dabei genügend Platz zum Drucken von Formen auch mit größeren Dimensionen oder für die gleichzeitige Fertigung vieler kleinerer Teile im Zuge eines Druckprozesses. Der Druckkopf erzielt auf der horizontalen Druckebene eine maximale Auflösung von ca. 250 – 1270 dpi (abhängig von der Bewegungsrichtung) und die minimale Schichtdicke liegt bei 0,28 mm. Dies ermöglicht, dass auch Konturen, welche von den Raumachsen abweichen, sehr präzise dargestellt werden können. Somit lassen

Abb. 6: Neue Rheometal-Anlage am GTK. Eigenmaterial (EEM Enthalpy Exchange Material, links) wird eingerührt (Mitte, Foto Comptech), woraus eine globulitische Struktur der Festphase resultiert (rechts).

sich die Vorteile der additiven Fertigung; in erster Linie die Herstellung hochkomplexer Formen, die mit klassischen Verfahren nicht oder nur sehr aufwendig realisierbar wären; im Rahmen eines effizienten und weitestgehend reproduzierbaren Verfahrens nutzen, [Abb. 7](#). Ein weiteres wichtiges Merkmal der Anlage ist die Nutzung von anorganischen Bindemitteln, da der rudimentäre Kenntnisstand über anorganisch gedruckte Formen eine weitreichende Anwendung dieser vielversprechenden Technologie im industriellen Maßstab

Abb. 7: Neuer Anorganik 3D-Formstoffdrucker S-Max Pro von ExOne am GTK mit Maschinenperipherie (links), Entnahmestation (Mitte) und gedruckte Sandgussform für das Forschungsprojekt „Emob“ (rechts).



7



Abb. 8: Neue W200 Mg-Warmkammer Druckgießzelle der Fa. Frech am GTK.

Abb. 9: Thermoanalysebereich: STA, LFA und Dilatometer der Fa. Netzsch.

aktuell noch stark ausbremsst. Dementsprechend lassen sich eine Vielzahl von Forschungsansätzen mithilfe der neuen Anlage am GTK verfolgen. Neben Grundlagenforschung über die Materialeigenschaften und deren Korrelation mit Prozessparametern ist beispielsweise die Herstellung komplexer Hohlstrukturen und deren konstruktive Auslegung und Umsetzung in Gusskomponenten ein geplanter Forschungsschwerpunkt am GTK. Des Weiteren wird in dem aktuell laufenden Projekt „Aktivformguss“ die Aufbereitung des Altsandes mittels einer Plasmabehandlung untersucht. Ziel ist es den Formstoff vollständig zu recyceln, wohingegen bei dem klassischen Verfahren mit Grünsandformen und eingelegten Kernen etwa 5 % des verwendeten Sandes deponiert werden muss.

Neue Magnesium-Warmkammerdruckgießzelle von Frech

Seit Ende 2022 steht die Magnesium Warmkammer-Druckgießmaschine W200 als Dauerleihgabe der „Oskar Frech GmbH + Co. KG“ dem GTK zu Forschungszwecken zur Verfügung, **Abb. 8**. Die W200 ist mit einem Widerstandsofen für bis zu 200 kg Magnesium bestückt und zeichnet sich durch eine vollständig

elektrische Beheizung des Gießaggregats aus. Sie erzielt eine Zuhaltekraft von 2200 kN und eine maximale Gießkraft von 130 kN. Durch die Warmkammertechnologie kann eine hohe Gussteilqualität bei sehr kurzen Zykluszeiten erzielt werden und es wird kein Kolbenschmiermittel benötigt. Mit einem Gießhub von 175 mm und einem variablem Gießkolbendurchmesser von 70, 80 oder 90 mm erreicht die W200 ein Gießvolumen von maximal 856 cm³ bei einem spezifischen Gießdruck von 204 daN/cm².

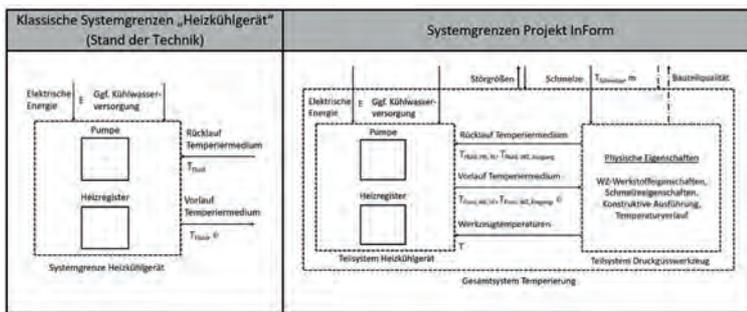
Moderne Forschungsansätze, die mithilfe der Anlage verfolgt werden können, sind unter anderem die optimierte Temperaturführung der Schmelze über eine gezielt segmentiert regelbare elektrische Beheizung des Gießaggregats, die Effizienzsteigerung der notwendigen Schutzgastechnologie, der Vakuumeinsatz im Mg-Warmkammer-Druckguss, der Einsatz von Heizkanalsystemen (Frech Gating System) und das Gießen von großen Mg-Gussteilen auf kleinen Maschinen, welche konventionell mit deutlich höheren Schließkräften produziert werden müssen.

Neben Forschungszwecken wird die Anlage auch für die Ausbildung des studentischen Nachwuchses eingesetzt. Im Zuge der Vorlesung „Modernes Druckgießen im Kontext von Industrie 4.0“ und des Praktikums „Modernes Mg Warmkammerdruck-

gießen“ erhalten die Studenten durch den Gastdozenten Dr. Norbert Erhard einen tieferen Einblick in die Technologie und dürfen die Maschine bedienen, Gießparameter berechnen und einstellen sowie die Schmelzeführung übernehmen.

Neues Dilatometer für die thermische Analyse

In den letzten Jahren wurde auch der Bereich der thermischen Analyse am GTK mit insgesamt drei Geräten der Fa. „Netzsch-Gerätebau GmbH“ stetig erweitert, **Abb. 9**. Mit dem simultanen thermischen Analysegerät „STA 449 F3 Jupiter“ können gleichzeitig Thermogravimetrie (TGA) und dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) auf eine Probe angewendet werden. Dies ermöglicht einen hohen Probendurchsatz und eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse, die aus den unterschiedlichen Messmethoden resultieren. Eine Besonderheit ist auch die Möglichkeit zum Einsatz von korrosiven Gas-Atmosphären. Mit dem Analysegerät können beispielsweise Kennwerte wie spez. Wärmekapazität und Phasenumwandlungstemperaturen ermittelt werden oder die Massenänderung auf Grund von Abdampfung sowie die Wechselwirkung von Werkstoffen mit unterschiedlichen Atmosphären untersucht werden. Des Weiteren gehört das Laser-Flash-Analysegerät „LFA 467 HT“ zur Ausstattung am GTK mit dem Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit von Materialien bestimmt wer-



10

Abb. 10: : Klassische Systemgrenzen und Systemgrenzen im Vorhaben „InForm“ der Regelung von Temperiergeräten.

den können. Die neuste Erweiterung ist das Dilatometer „DIL 402 Expedis Supreme“, welches zur Bestimmung temperaturabhängiger Dimensions- und Dichteänderungen sowie zur Charakterisierung von viskoelastischen Materialeigenschaften eingesetzt wird. Darüber hinaus können mit dem Laser-Flash-Analysegerät durch die Verwendung der im Dilatometer ermittelten temperaturabhängigen Dichteänderung auch die Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit neuartiger Verbundwerkstoffe präzise charakterisiert werden.

Mithilfe des erweiterten thermischen Analysebereichs lassen sich am GTK eine Vielzahl innovativer Forschungsansätze verfolgen. Dazu gehören unter anderem die Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit von Multimaterialverbunden oder des Oxidationsverhaltens von Magnesium, sowie die Materialcharakterisierung von mit anorganischem Bindemittel gedrucktem Formsand. Ein konkretes Beispiel, wozu bereits eine Veröffentlichung vorliegt, ist die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Kaltumformgrade auf die Ausscheidungsvorgänge von binären Kupferlegierungen bei anschließender Ausscheidungswärmebehandlung (DOI: 10.3390/met13010150). Die Veröffentlichung ist dabei durch eine Zusammenarbeit der dualen Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart mit der Universität Kassel und der TU Bergakademie Freiberg entstanden.

LOEWE-Projekt „InForm“ – Intelligente Formkühlung von Druckgusswerkzeugen

Leichtmetall-Druckguss ist ein wichtiger und stetig wachsender Bereich der Produktion in vielen innovativen Branchen. Typisch für den hochproduktiven Druckguss ist, dass die zuvor eingebrachte Schmelzwärme im Metall nach der Formgebung schnellstmöglich und zu großen Teilen über das Werkzeug und die im Werkzeug integrierte Fluidkühlung mittels Temperierkanälen abgeführt werden muss, um das Gussteil zur Erstarrung zu bringen und zu entnehmen. Die Formtemperierung nimmt zudem signifikanten Einfluss auf die Qualität des erzeugten Bauteils, die Zykluszeit sowie die Standzeit der Form.

Der Gusszyklus wird bislang zumeist „integral“ gesteuert, d. h. es wird für eine Serie von Gusszyklen eine empirisch ermittelte Vorlauftemperatur am Heizkühlgerät eingestellt, um die gewünschte Temperatur in der Kavität der Druckgussform zu erreichen. Die Systemgrenzen sind somit nur um das Temperiergerät gesetzt, die Druckgussform bleibt dabei als „Black-Box“ außen vor, [Abb. 10](#).

Der gewählte Lösungsansatz liegt in der Entwicklung und Erprobung eines Modells zur Beschreibung und Regelung der Formdynamik (Formtemperierung/Wärmehaushalt), das den Zusammenhang zwischen den Temperaturverläufen der Formoberfläche

und der Temperierebene im Werkzeug beschreibt und dadurch eine gezielte Regelung in der Praxis ermöglicht. Beide Verläufe stehen in einem eindeutigen physikalischen, d.h. mathematischen Zusammenhang.

Durch das Einbeziehen und Abbilden des Druckgusswerkzeugs innerhalb der Systemgrenzen der Temperierung ist auch eine tatsächliche Optimierung des Gesamtsystems für verschiedene Szenarien, wie kürzeste Zykluszeit, hohe Energieeffizienz oder ideale Bauteilqualität möglich. Zudem ist durch die Messung von Temperaturen im Druckgusswerkzeug in Verbindung mit dem Modell der Formdynamik ein schneller Eingriff in die Temperierung möglich. In den klassischen Systemgrenzen besteht hierbei eine enorme zeitliche Verzögerung durch Faktoren wie Temperaturleitfähigkeit des Stahls, der Leitungslänge sowie Transportdauer des Temperiermediums zwischen Druckgusswerkzeug und Temperiergeräten, wodurch es zu einer Trägheit des Gesamtsystems kommt. Ziel ist es einen neuen Regler zu entwickeln, der das Modell der Formdynamik beinhaltet, der über eine Offline-Optimierungssoftware an das individuelle Druckgusswerkzeug angepasst werden kann. Um dieses Ziel zu erreichen, wird im Projekt der optimale und kürzeste Weg zur Identifizierung der dynamischen Modellparameter gesucht und das Modell samt Regelung an einer industriellen



11



Abb. 11: : GTK-Gießerei-Kolloquium 2023. Grußworte durch die Bürgermeisterin Strube, den VW-Gießereichef Wöllenstein und den Kanzler Dr. Fromm sowie Prof. Fehlbiel (links), Verleihung der GTK-Ehrenmedaille an Prof. Feikus (Mitte) und einen Ausstellerstand (rechts).

Gießmaschine mit speziell für diese Aufgabe ausgelegten Kühlgeräten getestet und optimiert. Des Weiteren wird die simultane Regelung mehrerer Kühlkreise in einer Form untersucht.

Kasseler Gießerei-Kolloquium 2023

Nach den pandemiebedingten Ausfällen in den Vorjahren fand vom 26. – 27.01.2023 wieder das Kasseler GTK-Gießerei-Kolloquium statt, das gleichzeitig das 10-jährige Bestehen

Abb. 12: : GTK-Gießerei-Kolloquium 2023. Vortragender Hr. Schumacher vom BDG (links), Konferenzsaal (Mitte) und Gruppenfoto vor dem neuen 3D-Formstoffdrucker am GTK (rechts, Foto: Peter Dilling).

des Lehrstuhls für Gießereitechnik an der Universität Kassel markierte. Die knapp 200 Fachtteilnehmer, Studenten und 14 Aussteller ermöglichten zusammen mit den exzellenten Vortragenden die Austragung eines hochwertigen Kolloquiums im Campus-Center der Universität, das durch einen gemütlichen Gießereabend mit Live-Musik im Gießtechnikum Metakushalle abgerundet wurde. Hier wurden neben Glückwünschen durch die Bürgermeisterin von Baunatal Frau Strube, den Gießereichef der VW Gießerei Kassel und stellvertretendem Werksleiter Herrn Wöllenstein und dem Kanzler der Uni Herrn Dr. Fromm auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Feikus von Nemak die GTK-Ehrenmedaille für sein großes langjähriges Engagement für die Gießereibranche sowie für die Stärkung der Kooperationsbeziehungen zwischen Industrie und Hochschulen verliehen, **Abb. 11, 12**. Zudem wurden auch die neu erworbenen Geräte und Anlagen vorgestellt. Insgesamt war es eine

sehr schöne Veranstaltung mit interessanten Gesprächen und stimmungsvollem Ausblick.

* Dieses Projekt wird aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung als Teil der Reaktion der Union auf die COVID-19-Pandemie finanziert.



12





Anfragen zur kostenfreien Übersendung von Belegexemplaren oder zwecks redaktioneller Mitarbeit richten Sie bitte an



Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV)

Finkenstraße 10 • D-68623 Lampertheim

www.institut-wv.de

Telefon 06206 939-0 • info@alphapublic.de



Prof. Dr.-Ing. Dierk Hartmann

Hochschule für
angewandte Wissenschaften Kempten
Labor für Werkstofftechnik
und Betriebsfestigkeit

Mitarbeiter:

M.Sc. Tim Kaufmann





Datenbasierte Verfahren zur Steigerung der Energieeffizienz beim induktiven Schmelzen

In diesem Artikel wird am Beispiel einer Stahlgießerei gezeigt, wie anhand der datengetriebenen Modellierung mit Hilfe des maschinellen Lernens (ML) der Schmelzprozess von 1.2379 Stahl im Mittelfrequenzinduktionsofen hinsichtlich der Zielgröße Energieverbrauch modelliert werden kann. Die Ergebnisse der generierten Prognosemodelle werden aufgezeigt, sowie die Möglichkeit aufgrund der Prognoseergebnisse und einer Rückwärtsanalyse optimierte Gattierungskombinationen zu erzeugen.

Einleitung

Aufgrund stetig wachsender Herausforderungen, wie z.B. steigenden Rohstoff- und Energiekosten, gesetzlichen Regulierungen zu CO₂-Emissionen und einem zunehmenden, weltweiten Wettbewerb besteht in der Stahl- und Gießereiindustrie ein ständiger Bedarf nach Verbesserung der bestehenden Produktionsverfahren. Neben anlagentechnischen Verbesserungen, welche durch die Schmelzaggregats- und Anlagenhersteller erzielt werden, besteht auch weiterhin ein Potential in den Produktionsprozessen und Abläufen. Eine Methode zur Verbesserung dieser Prozesse ist die Modellierung.

In den letzten Jahren hat sich die Digitalisierung und das maschinelle Lernen als vielversprechender Modellierungsansatz z.B. in der Werkstoffentwicklung oder Prozessoptimierung für die Stahlindustrie erwiesen [1 – 3]. Im Folgenden wird exemplarisch beschrieben, wie mit Hilfe von ausgewählten Prozessdaten einer Stahlgießerei der Schmelzprozess im Mittelfrequenzinduktionsofen hinsichtlich des Energieverbrauches modelliert und im Anschluss mit Hilfe einer synthetischen Datenerzeugung und Rückwärtsanalyse optimiert werden kann.

Modellierung

Für die Modellierung wurden Daten aus der Prozess-, Induktionsofen- und Gattierungsdatenbank einer mittelständischen Stahlgießerei konsolidiert, vorverarbeitet und im Anschluss verschiedene Algorithmen aus dem Bereich des maschinellen Lernens wie z.B. Entscheidungsbäume (RandomForest, ExtraTrees), gradientenverstärkte Entscheidungsbäume (LightGBM, Catboost, XGBoost) und künstliche Neuronale Netze mit den Daten trainiert und deren Hyperparameter optimiert [4]. Die Hyperparameter werden vor Beginn des Lernprozesses festgelegt und beeinflussen, wie gut ein Modell

einen Prozess abbilden kann. Einige Beispiele von Hyperparametern beim maschinellen Lernen sind z.B. die Lernrate, die Anzahl der versteckten Schichten in einem „tiefen“ neuronalen Netz („Deep-Learning“) oder die Anzahl der Zweige in einem Entscheidungsbaum.

Als Schmelzaggregat dient ein Mittelfrequenzinduktionsofen mit einer Kapazität von ca. 7 t. **Bild1** zeigt eine Übersicht des Modellierungs-Workflows. Die Prozess- und Induktionsofendatenbanken enthalten u.A. Daten wie z.B. die chemische Analyse der gattierten Rohstoffe, die gemessene Schmelzzeit, die ge-

Kontakt

Hochschule für angewandte Wissenschaften
Kempten

Labor für Werkstofftechnik
und Betriebsfestigkeit

Prof. Dr.-Ing. Dierk Hartmann

Bahnhofstraße 61

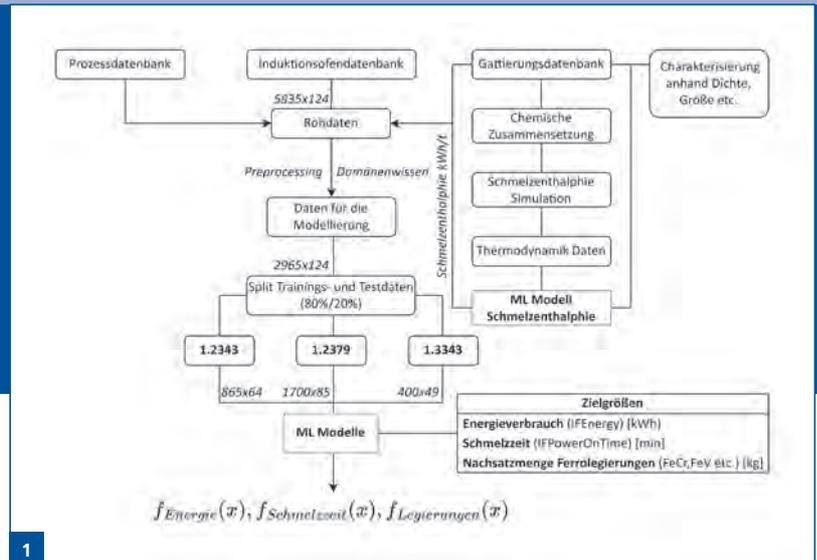
D-87435 Kempten

Tel.: +49 (0)831-2523-195

dierk.hartmann@hs-kempten.de

www.wp-kempten.de

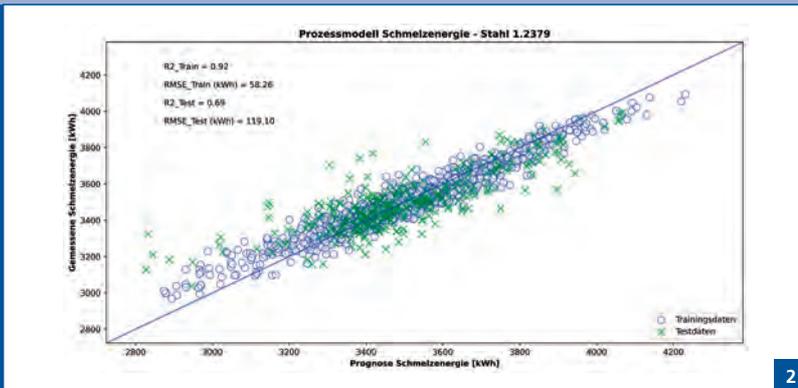
Abb. 1: Ablauf der Prozessmodellierung der Stahlsorten (z.B. 1.2379, 1700 Zeilen mit 85 Features),
© Hochschule Kempten.



messene benötigte Schmelzenergie der jeweiligen Schmelzen und vieles weiteres. Als Zielgrößen wurden die benötigte Schmelzenergie (kWh), die benötigte Schmelzzeit (min) um die geforderte Abstich Temperatur zu erzielen, sowie die im Anschluss an den Schmelzvorgang zur Korrektur der chemischen Analyse nachgattierten Legierungsmengen (Kohle, FeCr, FeV, FeSi etc. kg) gewählt. Die Gattierungsdatenbank enthält Daten der für die jeweilige Schmelze gattierten Schrotte, mit deren Mengenangaben und chemischen Analysen. In der Gießerei werden die Schrotte in separaten Boxen grob vorsortiert, sodass eine Differenzierung zwischen den eingesetzten Schrotten in einer Gattierung möglich ist. Aus den chemischen Analysen wurde in einem Zwischenschritt mit Hilfe einer Simulationssoftware die jeweilige zu erwartende Schmelzenthalpie der Schrotte berechnet (CALPHAD-Methode). Auf Basis der thermodynamischen Daten wurde ein ML-Modell trainiert, umso anhand der chemischen Analyse auch die theoretisch benötigte Schmelzenthalpie der Rohstoffe zu berücksichtigen. Die gemessenen Rohdaten umfassen ca. 6000 individuelle Schmelzen der drei Stahlsorten 1.2343, 1.2379 und 1.3343. Nach der Vorverarbeitung (Entfernen von Ausreißern, Formatieren der Daten etc.) und der Anwendung von Domänenwissen wurden ca. 50 % der Daten weiter für die Prozessmodellierung ge-

nutzt. Domänenwissen bedeutet in diesem Kontext das Begutachten und Filtern der Daten mit prozesstechnischem Verständnis. So wurden z.B. offensichtliche Ausreißer bzw. inkorrekte Daten wie z.B. negative Gattierungsmengen oder Füllungen des Ofens mit angeblich mehr als 7 t Material zum Teil nicht von den Vorverarbeitungsalgorithmen erkannt und händisch herausgefiltert. Der verbleibende Datensatz umfasst die Informationen von ca. 3000 individuellen Stahlschmelzen mit 124 Einflussvariablen (Spalten im Datensatz, Einflussgrößen; auch „features“ genannt), wobei ca. 40 – 60 dieser features gattierungsrelevante Einflussgrößen repräsentieren. Zusätzlich hierzu wurden die Stahlschrotte charakterisiert, d.h. Sie wurden in Gruppen wie Kreislauf- oder Fremdschrotte und Legierungen, sowie anhand Ihrer empirisch beurteilten Geometrie (Abschläge, „Knochen“, Platten, Hackschrott etc.) eingeteilt und als Informationen dem Datensatz hinzugefügt. Anschließend wurden die verbliebenen Daten in 80 % Trainings- und 20 % Testdaten aufgeteilt. Mit den Trainingsdaten wurden die Algorithmen angeleitet und im Anschluss daran mit den Testdaten auf Ihre Prognosegüte geprüft. Dieser Schritt ist erforderlich, da es beim Trainieren von

ML-Algorithmen zu „Over-“ oder „Underfitting“ kommen kann. Dies bedeutet, dass die Modelle zwar auf den Trainingsdaten gute Ergebnisse erzielen, bei unbekanntem, zukünftigen Prozessdaten aber nur schlechte Prognoseergebnisse erzielen. Die Testdaten werden im Vorfeld separiert, d.h. diese Datenmenge repräsentiert komplett unbekanntem, zukünftige Prozessdaten bzw. Zustände. Die Beurteilung der Prognose der Modelle erfolgte mit den Metriken MAE (mittlere absolute Fehler), MSE (mittlere quadratische Abweichung), RMSE (Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers) und R^2 (Bestimmtheitsmaß), jeweils zwischen der Prognose des Modells und dem „real“ gemessenen Wert der jeweiligen Schmelze im Testdatensatz. Die Zielgröße Energieverbrauch und dessen Prognosemodelle werden im Folgenden vorgestellt. Der Energieverbrauch beim Schmelzen im Induktionsofen hängt von vielen Faktoren, wie z.B. den gattierten Rohstoffen (feines oder sperriges Material, Verunreinigungen etc.), der eigentlichen Prozessführung (ist der Ofendeckel unnötig lange geöffnet, z.B. durch sperrige Schrotte in der Gattierung etc.) und vielen weiteren direkten und indirekten Einflussfaktoren ab. Aufgrund dieser Komplexität bietet sich eine Modellierung mit ML an.



2

Abb. 2: Ergebnis des Energiemodells im Test- und Trainingsdatensatz, © Hochschule Kempten.

Ergebnisse Modellierung

Bild 2 zeigt die Gegenüberstellung der anhand der input features durch das ML-Modell prognostizierten Werte des Energieverbrauches (x-Achse) und den real gemessenen Werten (y-Achse). Im Trainingsdatensatz beträgt das R^2 0,92 bei einem RMSE von 58 kWh und im Testdatensatz liegt es bei 0,69 bei einem mittleren Fehler von 119 kWh. Bei den Testdaten entspricht dies einem relativen Prognosefehler (bezogen auf den Mittelwert von ca. 3500 kWh) von ungefähr 3 – 4 %.

In Bild 3 ist die Residuenverteilung (Differenz zwischen real gemessenem Wert und Prognose durch das Modell) des 1.2379 Energiemodells im Testdatensatz dargestellt. Die Resi-

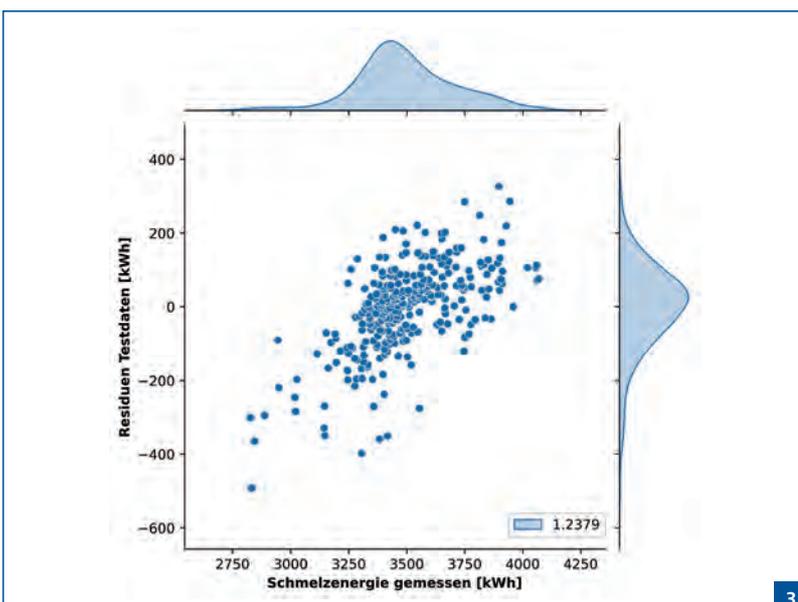
duenverteilung liefert Informationen darüber, wie gut die Prognosequalität eines Modells ist. Wenn die Residuen nicht annähernd normalverteilt sind, bedeutet dies, dass das Modell systematisch entweder zu einer Über- oder Untervorhersage neigt. Enthalten Sie außerdem ein Muster, so scheint das Modell einige Beziehungen innerhalb der Daten nicht erklären zu können und ist daher qualitativ inkonsistent. Bei dem erzeugten Modell sind die Residuen nahezu normalverteilt und der Prognosefehler scheint keinem Muster zu folgen.

Teil 2 Optimierung & Rückwärtsanalyse

Sobald ein trainiertes ML-Modell einsatzbereit ist, kann die Rückwärtsanalyse auf Grundlage des Trainings-

datensatzes angewendet werden, um den Wertebereich der unabhängigen Variablen zu bestimmen, für den die gegebene Zielvariable einen vorgegebenen Wert annimmt. Die Rückwärtsanalyse liefert dementsprechend eine Umkehrfunktion der Prognosefunktion, die verwendet werden kann, um optimierte Prozesswerte zu finden. In diesem Fall stellt dies eine Gattierungszusammenstellung dar, mit der Zielgröße Energieverbrauch.

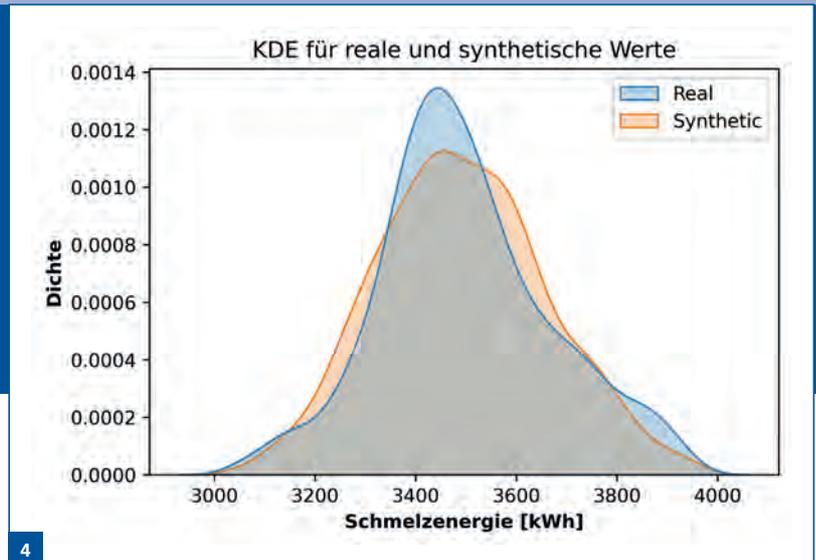
Zu diesem Zweck können verschiedene mathematische Optimierungsverfahren auf der Grundlage eines gut trainierten ML-Modells eingesetzt werden. Ein intuitiver und einfacher Ansatz besteht darin, eine dichte Menge der unabhängigen Prozessvariablen mit linearer Interpolation für einen bestimmten Bereich zu erzeugen, z.B. die Mindest- und Höchstwerte einer Variablen. Die Zielvariable wird dann auf der Grundlage dieses Satzes von generierten Variablen vorhergesagt. Diese Methode kann sehr rechenintensiv und daher zeitaufwendig sein. Außerdem werden bei dieser Methode die verborgenen Muster hinter dem Datensatz nicht berücksichtigt, so dass einige nützliche Informationen, die über den ursprünglichen Datensatz hinausgehen, einfach ignoriert werden.



3

Abb. 3: Residuen der Testdaten des Energiemodells, © Hochschule Kempten.

Abb. 4: Der KDE-Vergleich von realen und synthetischen Variablenwerten der Zielgröße Energieverbrauch, © Universität-Duisburg-Essen.



Um die verborgenen Informationen zu erfassen und den tatsächlichen Wert des Originaldatensatzes akkurat wiederzugeben, wird in dieser Arbeit eine auf Deep-Learning basierende Methode namens SDV („Synthetic Data Vault“) [5] eingesetzt. In der SDV-Bibliothek kommen verschiedene Algorithmen zur synthetischen Datenerzeugung, wie z.B. Gauß-Copula, zum Einsatz. Mathematisch gesehen ist eine Gauß-Copula eine Verteilung über den Einheitswürfel zwischen 0 und 1 in d Dimensionen, die durch Anwendung der Wahrscheinlichkeitsintegraltransformation auf eine multivariate Normalverteilung über alle reellen Zahlen \mathbb{R} erzeugt wird. Intuitiv ist die Gauß-Copula eine mathematische Funktion, die die gemeinsame Verteilung mehrerer Zufallsvariablen durch Analyse der Abhängigkeiten zwischen ihren Randverteilungen beschreiben kann. Sie kann die intrinsischen Informationen aus dem Originaldatensatz lernen, um neue synthetische Daten zu erzeugen, die das gleiche Format und die gleichen statistischen Eigenschaften wie der Originaldatensatz haben. Da die SDV-Bibliothek probabilistische Regeln erlernt, sind die meisten der synthetisierten Daten allgemein gültig. Um die Qualität der synthetischen Daten zu verbessern, können einige technische Beschränkungen bei der Erzeugung der Daten definiert werden. Zum Beispiel können Nebenbedingungen spezi-

fiziert werden, sodass z.B. die Werte einer Spalte im erzeugten Datensatz immer größer oder kleiner als einer anderen Spalte sind. **Bild 4** zeigt den Vergleich der „Kernel-Dichte-Schätzung“ (KDE) der Zielgröße Energieverbrauch in den realen und synthetischen Daten. Ihre Verteilungen sind einander sehr ähnlich. Im laufenden Produktionsprozess können mit Hilfe des SDV-Datensatzes zeitnah die Werte, mit denen die geforderte Qualität gemäß der Vorhersage am besten angenähert werden kann, für die unabhängigen Variablen ermittelt werden. Anschließend kann diese Auswahl weiter optimiert werden, z.B. im Hinblick auf Kosten- und Energieeffizienz.

Bild 5 zeigt den Prozess der Rückwärtsanalyse und der daraus resultierenden Optimierung auf der Grundlage eines Zielmaterials, der erforderlichen chemischen Elemente und der Schrottmengen, die in einer Schmelze enthalten sein müssen, um die Ziel-Zusammensetzung zu gewährleisten. Das Ziel der datengetriebenen Optimierung besteht darin, die kostengünstigste Schrottmischung bzw. das „Rezept“, unter Berücksichtigung des prognostizierten Energieverbrauches und der Metallausbeute, zu ermitteln. Die Datenbank, welche die Infor-

mationen der Schrottlieferanten beinhaltet, wird stetig aktualisiert und mit neuen Daten gespeist. Dies führt dazu, dass die Ergebnisse der Optimierung automatisch fortlaufend angepasst werden. Die Lösung des Programmierproblems sollte angeben, von welchem Schrottlieferanten, welche Art von Schrott und in welchen Chargen gekauft werden sollte, um die gewünschten Lagerbestände des Stahlherstellers aufrechtzuerhalten und die oben erwähnten Bedingungen (gewünschte chemische Analyse, minimierter Energieverbrauch, Nachgattung mit Ferrolegierungen) zu erfüllen bzw. die Kosten zu minimieren [6].

Die Verfügbarkeit bei den einzelnen Schrottanbietern, der Marktpreis und die Menge an Elementgehalten wie Chrom, Vanadium, Schwefel und Phosphor haben alle einen Einfluss darauf, wie wirtschaftlich wiedergewonnener Stahlschrott verwendet werden kann. Um zu gewährleisten, dass die Stahlqualitäten im gesamten Gussteil bzw. Halbzeug gleichbleibend sind und Kundenkriterien wie Schweißbarkeit und Härte erfüllen, ist es entscheidend, die Menge dieser Elemente in der finalen Schmelze zu kontrollieren. Als Hilfsmittel für Entscheidungsträger im Bereich des Schrotteinkaufs wurde ein modell-

		MAE [kWh]	MSE [kWh ²]	RMSE [kWh]	R2 [-]	Max_error [kWh]
1,2379	Traindata	44,12	3393,69	58,26	0,92	241,85
	Testdata	88,88	14184,22	119,1	0,69	491,86

Tab. 1: Übersicht der Prognose Metriken des Energiemodells.

basiertes lineares Optimierungsproblem erster Ordnung (LP) [8] entwickelt. Die Berechnungen werden von dem Modell unter Verwendung der Ergebnisse des zuvor gezeigten ML-Modells hinsichtlich des Energieverbrauches und von Schrottqualitätsdaten, Marktpreisen und Informationen über die Verfügbarkeit von Lieferanten durchgeführt. Preise, Qualitäts- und Lieferanteninformationen werden zusammen mit Qualitäts- und Dichtegrenzen und einem Produktionsplan in das Modell aufgenommen. Das LP betrachtet das folgende konvexe quadratische Programmierproblem:

$$\min_x c^T x + \frac{1}{2} x^T Q x$$

$$s. t. l^c \leq Ax \leq u^c$$

$$l^u \leq x \leq u^u$$

wobei A eine $m \times n$ Matrix und Q eine symmetrische und $n \times n$ positiv semidefinite Matrix ist. Die Vektoren der Input features haben die oberen Schranken u^c und u^u , sowie die unteren Schranken l^c und l^u , welche Werte in $R U \infty$ bzw. in $R U -\infty$ haben. Diese Gleichung setzt voraus, dass $l^c \leq u^c$ und $l^u \leq u^u$. Beispielsweise kann so berücksichtigt werden, dass ein gewisser Schrott immer nur von 500 kg bis 1500 kg eingesetzt wird, was durch prozesstechnische Gegebenheiten bedingt sein kann.

In dem Modell wird eine annähernd lineare Kostengleichung verwendet.

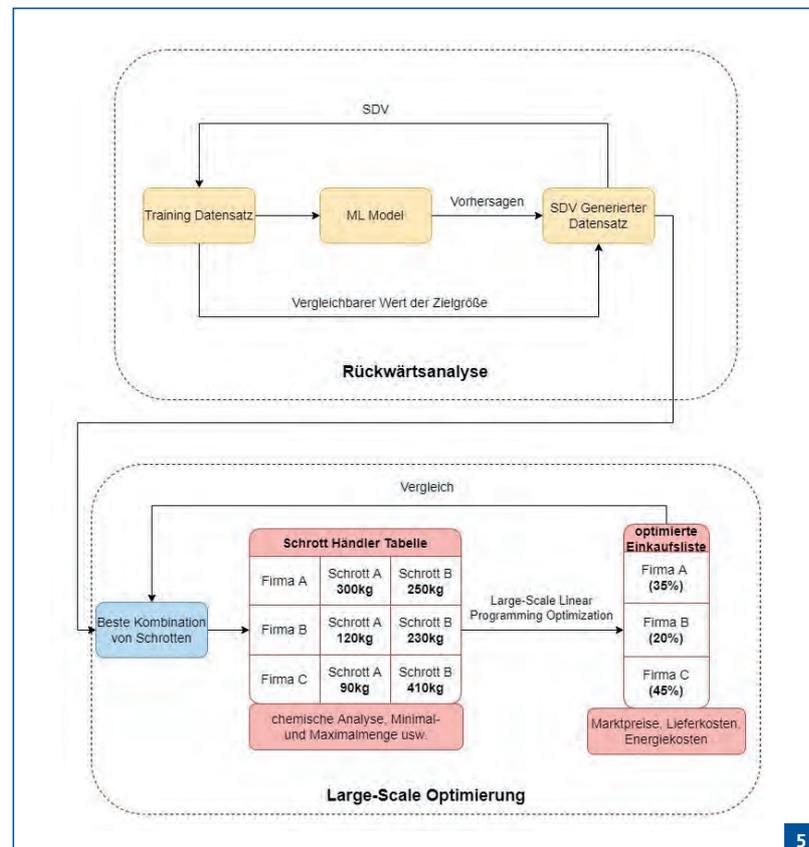
Die Schrottkosten werden durch die Marktpreise und die Verfügbarkeit sowie durch die internen Lagerhaltungskosten bestimmt. Die Energiekosten werden durch Schätzung der für jede Schrottart anhand des ML-Modells prognostizierten Energieverbrauches und der benötigten Strommenge berechnet. Die oben beschriebene Arbeit endet mit einer webbasierten Benutzeroberfläche (Bild 6), die den konkreten Einkaufsplan anzeigt. Der Transport des eingekauften Schrotts konnte durch

die Routenplanung berücksichtigt werden. Schließlich kann der CO₂-Fußabdruck für den Herstellungsprozess und die Logistik des Schrottes berechnet und verfolgt werden.

Fazit

In diesem Artikel wurde aufgezeigt wie mit Hilfe moderner Verfahren aus dem Bereich „künstliche Intel-

Abb. 5: Ablauf der Rückwärtsanalyse, © Universität-Duisburg-Essen.



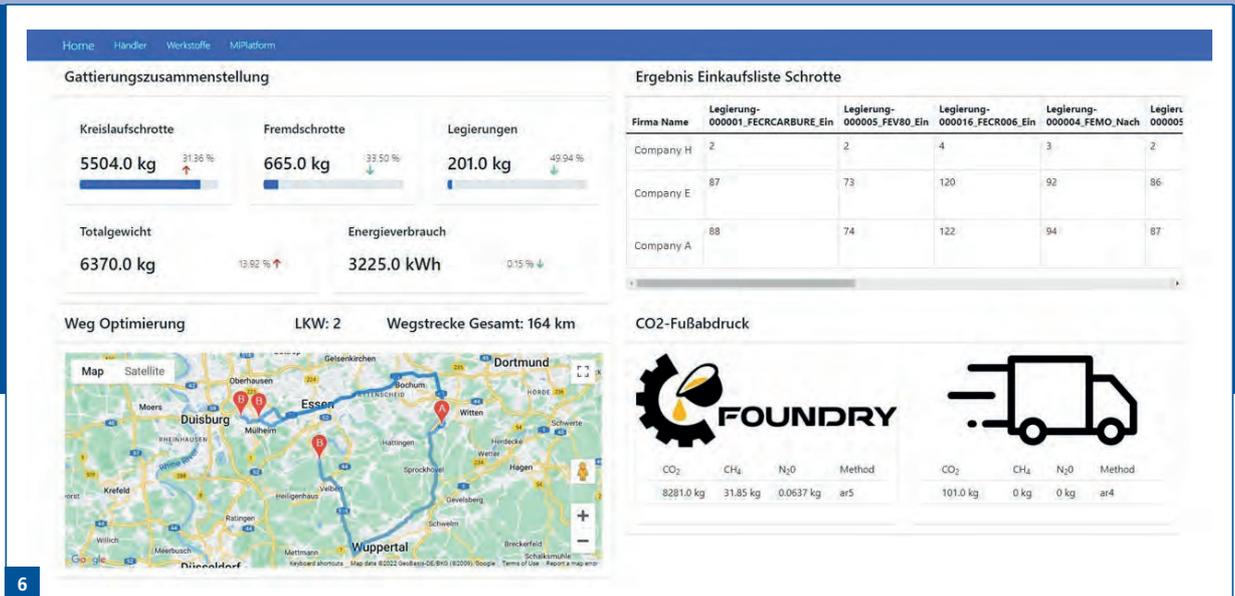


Abb. 6: Übersicht über die gesamte Software. Im Hintergrund greift die Software auf das erzeugte ML-Modell sowie auf die Datenbank der verfügbaren Schrotte zu und generiert eine optimierte Einkaufsliste für die Schrotte. Berücksichtigt werden die Faktoren Energieverbrauch, Preis, CO₂-Emissionen, Wegstrecke und gewünschte chemische Zusammensetzung, © Universität-Duisburg-Essen.

lizenzen“ bzw. ML und mathematischer Optimierungsverfahren der Schmelz- und Einkaufsprozess in der Stahlindustrie modelliert bzw. optimiert werden kann. Die erzeugten Prozessmodelle können mit einem relativen Fehler von ca. 3 – 5 % Prognosen hinsichtlich des zu erwartenden Energieverbrauches liefern. Im Anschluss kann mit der Optimierungssoftware eine Schrottzusammenstellung erzeugt werden. Hierbei wird die Zusammenstellung der Einkaufsliste aus rein monetärer Sicht (Schrottpreise) durch die Berücksichtigung der Ressourcen- und Energieeffizienz ergänzt. Die Gießerei- und Stahlindustrie hat auf dem Weg vom Rohstoff zum fertigen Gussteil bzw. Halbzeug naturgemäß eine Vielzahl von (Teil-) Prozessen zu durchlaufen, bei denen eine hohe Menge an Produktionsdaten anfallen. Für eine zukünftige, datengetriebene Optimierung der

Gießereiprozesse gilt es diese Daten zu konsolidieren umso das vorhandene Wissen in Ihnen mit Hilfe von Werkzeugen wie dem maschinellen Lernen nutzbar für die Prozessoptimierung zu machen. Hierdurch kann ein weiteres hilfreiches Tool, ähnlich der Gießsimulation, dem Gießer an die Hand gegeben werden, um bestehende Prozesse und Abläufe weiter zu verbessern.

Die Erstveröffentlichung dieses Artikels erfolgte in „stahl. – Das Magazin für die Stahlindustrie“, Nr. 5 – 6, 2022.

Literatur

- [1] Lee, Jin-Woong, et al. „A machine-learning-based alloy design platform that enables both forward and inverse predictions for thermo-mechanically controlled processed (TMCP) steel alloys.“ Scientific reports 11.1 (2021): 1-18.
- [2] Klanke, Stefan, et al. Advanced data-driven prediction models for BOF endpoint detection. Association for Iron & Steel Technology 2017 Proceedings, 2017, S. 1307-1313.
- [3] Ji, Yingjun, et al. A machine learning and genetic algorithm-based method for predicting width deviation of hot-rolled strip in steel production systems.

Information Sciences, 2022, 589. Jg., S. 360-375.

- [4] Erickson, Nick, et al. „Autoglun-tabular: Robust and accurate automl for structured data.“ arXiv preprint arXiv: 2003.06505 (2020).
- [5] Patki, Neha, Roy Wedge, and Kalyan Veeramachaneni. „The synthetic data vault.“ 2016 IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA). IEEE, 2016.
- [6] Dutta, Goutam; Fourer, Robert: A survey of mathematical programming applications in integrated steel plants. In: Manufacturing & Service Operations Management 3 (2001), Nr. 4, S. 387–400
- [7] Miletic, I; Garbaty, R; Waterfall, S; Mathewson, M: Model-based optimization of scrap steel purchasing. In: IFAC Proceedings Volumes 40 (2007), Nr. 11, S. 263–26
- [8] Applegate, David; Diaz, Mateo; Hinder, Oliver; Lu, Haihao; Lubin, Miles; O' Donoghue, Brendan; Schudy, Warren: Practical Large-Scale Linear Programming using Primal-Dual Hybrid Gradient. In: Ranzato, M. (Hrsg.) ; Beygelzimer, A. (Hrsg.) ; Dauphin, Y. (Hrsg.) ; Liang, P.S. (Hrsg.) ; Vaughan, J. W. (Hrsg.): Advances in Neural Information Processing Systems Bd. 34, Curran Associates, Inc., 2021, S. 20243–20257



Jahresmagazin **Werkstofftechnik**

Ingenieur
wissenschaften
2022

ISSN 1618-8357
EUR 9,80

Herausgegeben vom Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen



Anfragen zur kostenfreien Übersendung von
Belegexemplaren oder zwecks redaktioneller Mitarbeit
richten Sie bitte an



Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV)

Finkenstraße 10 • D-68623 Lampertheim

www.institut-wv.de

Telefon 06206 939-0 • info@alphapublic.de



Prof. Dr. Dipl.-Ing. Peter Schumacher
Institutsleitung

Department für Metallurgie
Lehrstuhl für Gießereikunde

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Dipl.-Ing. Peter Schumacher
Frau Tanja Moser, DW-3301



Forschungsgebiete

Schmelzmetallurgie
Veredelung
Kornfeinung Al, Mg, Cu
Schmelzeinheit
Legierungsentwicklung
Thermodynamische Simulation



Montanuniversität Leoben – Lehrstuhl für Gießereikunde

Der Lehrstuhl für Gießereikunde an der Montanuniversität Leoben betreibt Forschung mit dem Schwerpunkt auf dem grundlegenden Verständnis der metallurgischen Vorgänge in der Gießereitechnik. Gemeinsam mit dem Österreichischen Gießereinstitut (ÖGI) spannen die Forschungsgebiete einen großen Bogen über die Themengebiete der Gießereitechnik vom Atom bis zum Gussteil. Im Mittelpunkt der Forschungstätigkeit des Lehrstuhls für Gießereikunde steht die verfahrensoptimierte Mikrostruktur und Legierungsentwicklung mit den Schwerpunkten Veredelung und Kornfeinung. Da bei stehen dem Lehrstuhl Kleinschmelzöfen unter kontrollierten Laborbedingungen bis hin zu hochauflösenden Mikroskopen und Messmethoden zur Verfügung. Die Forschungsgebiete des Lehrstuhls für Gießereikunde werden durch Themengebiete im Bereich der entwicklungsnahe Gießereitechniken am Österreichischen Gießereinstitut ergänzt. In den Laboren des ÖGI stehen hierbei modernste Anlagen im Bereich der mechanischen Prüfung, der Computertomographie, der thermophysikalischen Messung sowie der analytischen Chemie und Metallographie zur Verfügung.

Des Weiteren gehört es zur Aufgabe des Lehrstuhls für Gießereikunde die Fortbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses zu fördern. Innerhalb des Studiums der Metallurgie an der Montanuniversität Leoben bietet der Schwerpunkt Gießereikunde die Möglichkeit die gesamte Gießereitechnik, von den Gießverfahren, bis hin zu den metallphysikalischen Grundlagen der Materialwissenschaft abzudecken. Einzigartig ist hierbei die Möglichkeit, sich neben der Gießereitechnik auch im Bereich der Eisen- und Stahlmetallurgie, der Nichteisenmetallurgie sowie der Umformtechnik und Simulation weiterzubilden. Neben der wissenschaftlichen Ausbildung wird in Rahmen der verpflichtenden Industriepaxis und zahlreicher praktischer Übungen großer Wert auf die praktische Ausbildung gelegt. Studierende der Gießereitechnik wird hierbei ermöglicht, topologisch optimierte Gussteile zu simulieren, Modelle mittels 3D-Druck selbst herzustellen und am Lehrstuhl bzw. in Kooperation mit dem ÖGI in verschiedenen Gießverfahren abzugießen und schließlich mittels Computertomographie zu untersuchen und deren mechanische Eigenschaften zu testen. In Kooperation mit dem ÖGI arbeiten insgesamt 15 wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl gemeinsam mit

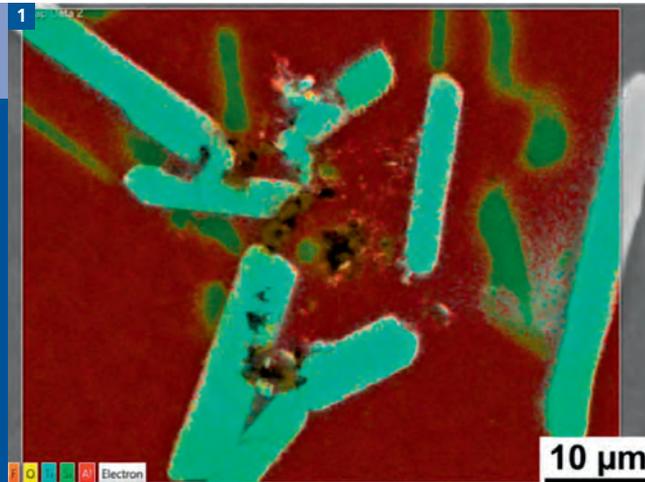
Technikern und allgemeinem Personal erfolgreich in den Bereichen:

- Eutektische Kornfeinung
- Kornfeinung von Al-Si-Legierungen
- Kornfeinung von Kupferlegierungen
- Wärmebehandlung von Aluminiumlegierungen
- Hochfeste Mg-Zn-Gd Legierungen
- Temperatur und Gefügekontrolle im Druckguss
- Prozesstechnik im Gießereiwesen
- Kerntechnologie

Kontakt

Montanuniversität Leoben
Department für Metallurgie
Lehrstuhl für Gießereikunde
Prof. Dr. Dipl.-Ing. Peter Schumacher
Franz-Josef-Straße 18
A-8700 Leoben, Österreich
Tel.: +43 (0)3842 402-3301
Tel.: +43 (0)3842 402-3302
giesskd@unileoben.ac.at
www.unileoben.ac.at

Abb. 1: EDX-Mapping eines Agglomerats



Montanuniversität Leoben

Die Themengebiete Mineralien, Metalle und Materialien und damit die energie- und umweltschonende Gewinnung von Ressourcen stehen im Focus der Montanuniversität in Leoben. Die Montanuniversität Leoben ist die drittmittelstärkste und forschungsaktivste Universität in Österreich. Immer wieder belegt die Montanuniversität bei Studentenumfragen den ersten Platz, wenn Einstellungsfähigkeit und spätere Karrierechance sowie Kontakte der Hochschule zur Wirtschaft, oder die Reputation der Hochschule bei Arbeitgebern betrachtet werden. Derzeit nutzen über 4500 Studenten in Leoben diesen goldenen Weg in die Wirtschaft und Forschung.

Der Lehrstuhl Gießereikunde an der Montanuniversität Leoben

Die gesamte Gießereitechnik von den automatisierten Gießverfahren bis hin zu den metallphysikalischen Grundlagen der Materialwissenschaft wird innerhalb des Bachelorstudiums der Metallurgie (BSc) von dem Lehrstuhl für Gießereikunde abgedeckt. Das anschließende Masterstudium schließt einzigartig im deutschsprachigen Raum mit einem Diplomingenieur (Dipl. Ing.) und Master of Science (MSc) ab und beinhaltet die Möglichkeit, sich neben der Gießereitechnik auch der Eisen- und Nichteisenmetallurgie wie auch der Umformtechnik zu widmen. Ziel ist es, aufbauend auf den naturwissenschaftlichen Grundlagen, die Metallurgie und damit die Gießtechnik tiefgehend zu beherrschen, wobei auch ergänzende Fächer der Betriebswissenschaften und Umwelttechnik die Ausbildung abrunden. Anschließend besteht die Möglichkeit eines Doktorates für wissenschaftlich vertiefende Fragestellungen der Gießereitechnik.

An der Montanuniversität wird großer Wert auf die praktische Ausbildung gelegt, die innerhalb des Bachelorstudiums mit einem Semester der verpflichtenden Industriepaxis und zahlreichen praktischen Übungen erfolgt.

Studierenden der Gießereitechnik wird dadurch ermöglicht, von einem durch Bionic und Topologie optimierten Design dessen Gießtechnik zu simulieren und diese selbst als Modell im 3-D Druck herzustellen und in Kooperation mit dem Österreichischen Gießerei-Institut diese in verschiedenen Gießverfahren abzugießen, mit der Computertomographie zu untersuchen sowie ihre mechanischen Eigenschaften zu optimieren.

Die Kooperation mit dem Österreichischen Gießerei-Institut, ÖGI

Der Schwerpunkt des Lehrstuhls für Gießereikunde liegt auf dem grundlegenden Verständnis der metallurgischen Vorgänge in der Gießereitechnik, während der Fokus des Österreichischen Gießerei-Instituts ÖGI auf der entwicklungsnahe Gießereitechnik liegt. Damit ergänzen sich die Themengebiete der Gießereitechnik innerhalb der Kooperation über die ganze Bandbreite vom Atom bis hin zum Gussteil. Die Ausstattung für die Lehre und Grundlagenforschung am Lehrstuhl erstreckt sich von Kleinschmelzöfen unter kontrollierten Bedingungen bis hin zu hochauflösenden Elektronen-Mikroskopen und Messmethoden. Diese werden am ÖGI ergänzt durch modernste Gießereianlagen, die alle bedeutenden Gießverfahren des Sand-, Kokil-

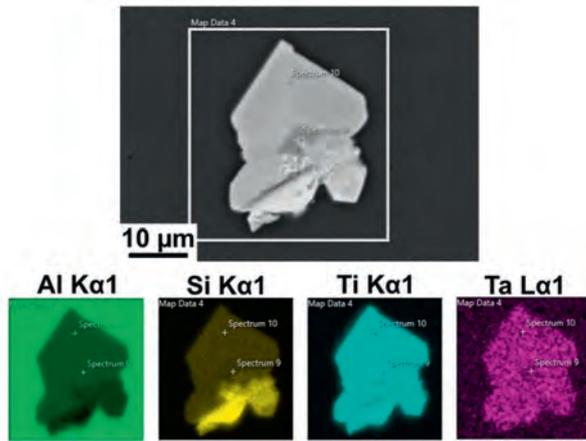


Abb. 2: EDX-Mapping tau1 Phase mit homogener Tantalverteilung [4]

len- und Druckgusses abdecken und in Kooperation mit dem Lehrstuhl betrieben werden. Zudem haben die Studenten mit ihren Forschungsarbeiten Zugang zu den modernen Laboren des ÖGI in den Bereichen der mechanischen Prüfung, Computertomographie, thermophysikalischen Messungen sowie der analytischen Chemie und Metallographie. Die Forschungsbereiche des Lehrstuhls für Gießereikunde haben ihren Schwerpunkt auf dem Gebiet der verfahrens-optimierten Mikrostruktur- und Legierungsentwicklung. Die aktuellen Themenstellungen sind im Folgenden kurz beschrieben und auf weiterführende Literatur wird hingewiesen.

Eutektische Kornfeinung

Aluminiumgussteile mit dünnen Wandstärken, wie Zylinderköpfe, herzustellen. Um optimale Materialeigenschaften einzustellen, werden die Al-Si Legierungen mit Spurenelementen von Strontium oder Natrium behandelt. Mit dieser Zugabe werden die Siliziumkristalle von störenden Platten in runde Fasern eingeformt, d.h. veredelt, und es werden bessere mechanische Eigenschaften erzielt. In Grundlagenuntersuchungen im Raster-Transmissions-Elektronen-Mikroskop konnte gezeigt werden, dass das Strontium an bestimmten Positionen im Siliziumkristall durch Zwillingsbildung hilft, den Kristall einzurunden. Trotzdem kann es in bestimmten Bereichen zu unerwünschten Ungleichmäßigkeiten kommen.

Dies beruht zum einen auf unerwünschten Anreicherungen (Seigerungen) von Veredelelementen und zum anderen auf Wechselwirkungen der Veredelelemente mit Keimbildnern für den Siliziumkristall. Es kommt zu einer unvorteilhaften Grobkornbildung des Al-Si Eutektikums, dessen Korn mehrere Millimeter einnehmen kann. Um die Wechselwirkung der Spurenelemente zur Veredelung besser verstehen zu können, müssen die Vorgänge auf einer Größenskala vom Atom bis hin zur Wandstärke untersucht werden. Insbesondere das Spurenelement Europium hat eine Schlüsselrolle im Verständnis der Veredelung des Aluminium-Silizium Eutektikums [1]. Sein hoher Kontrast in hochauflösender Elektronen-Mikroskopie erlaubt es, einzelne Atome des Veredelelements im Silizium darzustellen und seine Rolle als Zwillingsbildner im Silizium aufzuzeigen. Durch die Zwillingsbildung können die Siliziumkristalle makroskopisch eingrundet wachsen. Jedoch bestehen auch andere Wechselwirkungen, wie z.B. zum Phosphor, so dass eine Keimbildung des Eutektikums erschwert wird und sich auffällig grobe Eutektische Körner bilden, wie sie auch für Zugaben von Na oder Sr beobachtet worden sind [2].

Kornfeinung von primären Aluminium in Al-Si Legierungen

Der bei Aluminium sehr weit verbreitete Kornfeiner TiB_2 verliert bei dem

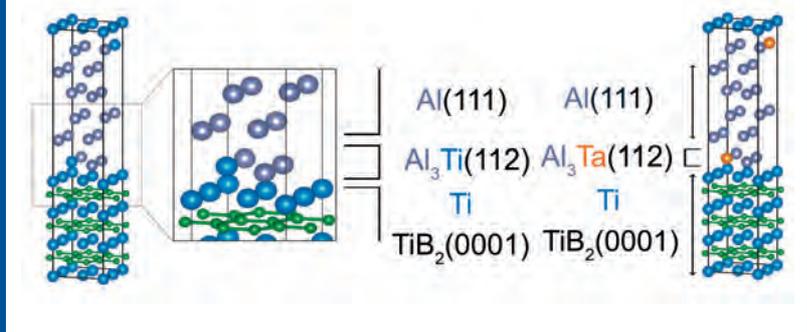
Einsatz in Aluminium-Silizium Legierungen sehr schnell an Wirkung, dies wird durch Vergiftungserscheinungen die an der Grenzfläche des Keimbildenden Partikels verursacht. Dies ist dadurch bedingt, dass bei überstöchiometrischen Verhältnissen verfügbare freie Titan über eine peritektische Reaktion Al_3Ti an der Grenzfläche bilden würde und ein gutes Substrat für das Wachstum von Primäraluminium darstellt. Jedoch wird ab einem Gehalt von 3.5 % Si die Formierung von Ti-Siliciden, $Ti_7Al_5Si_{14}$ der τ_1 Phase, begünstigt. Dieses Verhalten wurde von Gröbner et al. angenommen und modelliert. [3]

Für ein besseres Verständnis dieses Vorganges und die vorbereitenden Maßnahmen zur Manipulation dessen wurden in einer 10 % Si-Legierung vergiftete Partikel gezüchtet und mit Hilfe der Porous Disc Filtration Analyse (PoDFA) angereichert und deren Morphologie im Rasterelektronenmikroskop untersucht. In **Abbildung 1** sind diese nadelartigen Ti-Silicide sichtbar. [4]

Die Idee besteht nun darin, das für Silizium anfällige peritektische Al_3Ti durch die Zugabe von Tantal zu ersetzen. Thermodynamisch gesehen liegt die Al_3Ta Phase knapp über der Al_3Ti und besitzt den Vorteil, dass sie keine Silicide bildet. In einer Versuchsreihe wurde nun Tantal einer Schmelze mit bereits vergifteten Kornfeiner in geringen Mengen, 0.05 % Ta, zugesetzt

3

Abb. 3: Untersuchungen bezüglich der Vergießbarkeit dieser modifizierten Legierung zeigten in Bezug auf Fließlänge und Warmrissanfälligkeit durchaus positive Effekte die durch die verbesserte Kornfeinung begründet werden können. [6]



und die Auswirkung auf die Kornfeinung studiert. Dabei wurde beobachtet, dass Tantal mit dem noch freien Titan eine homogene Schicht um die Partikel bildet, welche als Substrat für den Aluminiumprimärkristall wirksam bleiben. In **Abbildung 2** ist dieses einhüllende Perititikum sichtbar. [4]

Es konnte gezeigt werden, dass durch die Zugabe von Tantal dieser Effekt umkehren lässt. Es kommt nun zu einer Ausbildung einer Al_3Ta Schicht über dem TiB_2 Partikel, welche wieder als wirksame Keimstellen für den Primäraluminiumkristall fungieren. Bei den TP1 Tests konnte die Korngröße von Anfangs $638 \mu\text{m}$ auf $289 \mu\text{m}$ nach der Behandlung reduziert werden. [4] Es wurden weiterführende Untersuchungen am Lehrstuhl ange stellt und die Möglichen Konfigurationen mit Hilfe von Density Functional Theory Simulationen abgebildet. Dabei zeigte sich, dass die Oberflächenenergie zwischen der Grenzfläche TiB_2 und Al_3Ti sowie TiB_2 und Al_3Ta nahezu identisch ist und einen weiteren Indikator zur vollständigen Ersetzbarkeit von freiem Titan durch Tantal an der Grenzfläche möglich ist, deren Sandwichstruktur am Übergang in **Abbildung 3** dargestellt ist. [5]

Kornfeinung von Magnesium AZ Legierungen

Unter den Magnesiumlegierungen ist die Familie der Aluminium-Zink-Legierungen eine der am weitesten verbreiteten. Sie zeichnet sich durch ihre

guten mechanischen Eigenschaften aus. Sie besitzt jedoch den Nachteil, dass sie sich schwer kornfein lässt. Die bei anderen Legierungen sehr wirksame Kornfeinung durch die Zugabe von Zirkon, erweist sich hier als wenig effektiv, da sich intermetallische Al-Zr Phasen ausbilden und somit das Zirkon unwirksam machen. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit der Weg über eingebrachte Partikel, Magnesiumnitrid, als Keimstelle für die Primärkristalle verwendet. Wie bei allen Partikelgestützten Kornfeinern ist es notwendig für eine ausreichende Benetzung zu sorgen. Dies konnte über zwei Wege erreicht werden, wobei auch die industriell mögliche Umsetzung gezeigt wurde. [7] Der damit hergestellte kann wie jeder Kornfeiner in der Industrie der Schmelze als Vorlegierung zugegeben werden. Im Kokillenguss konnte dadurch die Korngröße von $1134 \mu\text{m}$ auf $169.9 \mu\text{m}$ reduziert werden.

Weiters zeigte sich, dass der Kornfeiner auch auf die eutektische Korngröße reduzierend wirkt. In einer zweiten Versuchsserie konnte die Zeitbeständigkeit der Partikel nachgewiesen werden. Dafür wurde eine Messreihe mit dem TP-1 Test absolviert und nach einer Aktivierungszeit von 30 min bis zum Ende der Reihe von 90 min eine stabile Korngröße von $150 \mu\text{m}$ gehalten werden. Dabei wurde die Gleichmaßdehnung von 2.61 % auf 5.99 % und die Zugfestigkeit von 160 MPa auf 205 MPa gesteigert werden. [8]

Synopsis

Die hier vorgestellten Beispiele der Forschungsschwerpunkte des Lehrstuhls für Gießereikunde zeigen deutlich Bereiche, in denen das Verständnis der Gießerei-Industrie noch nicht vollständig ausgereift ist und weiterer Forschungsbedarf besteht. Erst durch das Verständnis auch von Randthemen wird es möglich sein, Modelle in der Gießereiindustrie aufzustellen, mit denen virtuelle Zwillinge über Modellbildung und Simulation und schlussendlich eine totale Prozesskontrolle wirklich werden. Dafür muss ein Brückenschlag zwischen Grundlagennaher und Gießerei-naher Forschung und Entwicklung, wie sie zwischen dem Österreichischen Gießerei-Institut und dem Lehrstuhl für Gießereikunde an der Montanuniversität Leoben praktiziert wird, erfolgen.

Literatur

- [1] J. Li, F. Hage, M. Wiessner, L. Romaner, D. Scheiber, B. Sartory, Q. Ramasse, P. Schumacher, The roles of Eu during the growth of eutectic Si in Al-Si alloys, Scientific Reports, 5 (2015) Artikel Nr.13802.
- [2] J.H. Li, Y.G. Yang, S. Sönmez, J.A. Taylor, B. Oberdorfer, D. Habe, S. Heugenhauer, P. Schumacher, Simultaneously refining eutectic grain and modifying eutectic Si in Al-10Si-0.3Mg alloys by Sr and CrB₂ additions, International Journal of Cast Metals Research, 29 (2015) 158–173.

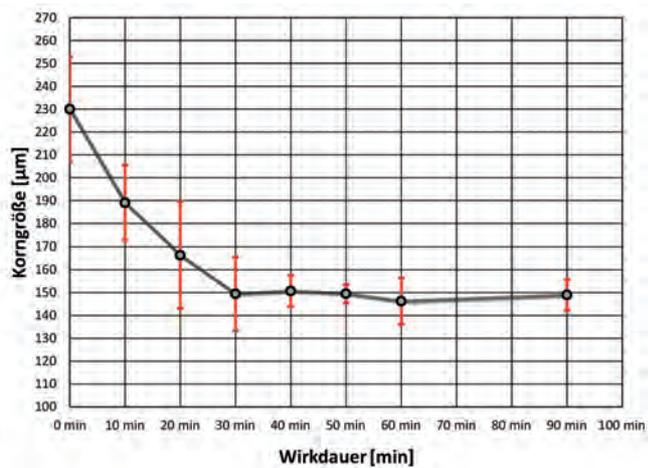


Abb. 4: Wirkdauer Magnesiumnitrid AZ80 [8]

- [3] J. Gröbner, D. Mirković, R. Schmid-Fetzer, *Materials Science and Engineering: A* 395 (2005) 10–21.
- [4] M. Pammer, *Siliziumvergiftung und der Einfluss von Tantal auf die Kornfeinung von AlSi-Legierungen*, Masterarbeit (2022)
- [5] I. Spacil, D. Holec, P. Schumacher, J. Li, *Effect of Solute Ta on Grain Refinement of Al-7Si-0.3Mg Based Alloys*, *Solid State Phenomena*, ISSN: 1662-9779, Vol. 327, pp 54-64
- [6] L. Lang, *Einfluss von Ta auf die Vergießbarkeit von AlCu und AlSi Legierungen*, Bachelorarbeit (2022)
- [7] J. Li, M. Pammer, E. Neunteufl, P. Schumacher. *Effect of the Mg₃N₂ nanoparticle on the grain refinement of AZ80 alloy*, S2P (2021)
- [8] T. Hösele, *Untersuchung der Wirkdauer von Magnesiumnitrid als Kornfeiner für AZ-Legierungen*, Bachelorarbeit (2022)



Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Technische Universität München
Lehrstuhl für Umformtechnik und
Gießereiwesen (utg)

Mitarbeiter:

Simon Kammerloher
Steffen Klan
Stefanie Prauser



Gießereihalle des Fraunhofer IGCV
in Garching,
Foto: Fraunhofer IGCV / Oliver Heissner



Gießereitechnik München – Forschung durch zwei starke Partner

Die Gießereitechnik München ist das Bindeglied zwischen dem eher grundlagenorientierten TUM Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) und der industrienäheren Ausrichtung des Fraunhofer-Instituts für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV. Unter dem gemeinsamen Namen wird die Bandbreite der Forschung und Entwicklung in der Gießereitechnik am Standort München gebündelt. Insgesamt forschen 20 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter an interdisziplinären und zukunftsorientierten Themen im Bereich der Gießereiindustrie.

Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der TUM

Seit seiner Gründung im Jahre 1968 steht der Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) der Technischen Universität München (TUM) für Forschung und Innovation im Bereich der umformenden und umformenden Fertigung.

Die Kombination der Schwerpunkte Schneiden, Umformen und Gießen ermöglicht dabei eine umfangreiche Betrachtung komplexer Fertigungsprozesse. Speziell im Forschungsgebiet der Gießereitechnik wird neben einer engen Zusammenarbeit mit der

Industrie grundlagennahe Forschung betrieben, um den Grundstein für die Lösung kommender Themen in der Industrie legen zu können. Durch eine ausgewogene Balance zwischen Forschung und Lehre erhalten Studierende am utg einen tiefen Einblick in aktuelle Themen der Gießereiindustrie.

Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV

Der Wissenschaftsbereich der Gießereitechnik des Fraunhofer IGCV konzentriert sich auf das Gießen metallischer Werkstoffe. Zu unseren Kernkompetenzen zählen die Themengebiete indirekte Additive Fertigung, Formstoffe, Prozessentwicklung und Analytik. Diese Kombination stellt eine hervorragende Ausgangsposition für eine fachübergreifende Forschung dar.

Im Sommer 2021 wurde die neue Versuchshalle am Standort Garching bezogen. Die nun vorhandene hochwertige Ausstattung ermöglicht eine innovative Forschung an anwendungsnahen Problemstellungen der Industrie.

Material Jetting (MJT)

Am Lehrstuhl utg wird seit einigen Jahren der MJT Prozess mit metalli-

schen Werkstoffen erforscht. Beim MJT Prozess handelt es sich um ein additives Fertigungsverfahren, bei dem ein Bauteil aus einzelnen Tropfen aufgebaut wird.

Kupferwerkstoffe im MJT

Bisherige Forschungsprojekte untersuchten die Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen oder von Salzen als Stützstrukturen für den Aluminiumdruck. In diesem Schritt wird der Prozess hinsichtlich der Einsetzbarkeit von Kupferwerkstoffen untersucht. Durch die besonders gute thermische und elektrische Leitfähigkeit ist Kupfer insbesondere für Anwendungen im Bereich der Elektroindustrie und des Thermomanagements gefragt.

Kontakt

Gießereitechnik München
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk
Walther-Meißner-Straße 4
D-85748 Garching
Tel.: +49 (0)89 289-13791
info@utg.de
www.giessereitechnik-muenchen.de

Abb. 1: Im Verfahren Material-Jetting hergestelltes Bauteil aus Kupfer-Zinn-Bronze (CuSn8), Foto: utg/Kirchbner



Neue Druckkopfentwicklung

Werden besondere Anforderungen an die Geometrie der Bauteile gestellt oder geringe Stückzahlen gefordert, können Bauteile oftmals nur durch additive Verfahren wirtschaftlich gefertigt werden. Mit den bisher weit verbreiteten laser-pulverbettbasierten Verfahren ist die Verarbeitung von Reinkupfer aufgrund des geringen Absorptionsgrads der Laserstrahlung prozesstechnisch aufwendig. Mit dem MJT Prozess soll ein additives Fertigungsverfahren untersucht werden, mit welchem Kupferbauteile ohne Einsatz von Laser und Pulver additiv gefertigt werden können. Mit einem neu entwickelten Druckkopf werden Studien durchgeführt, um den Einfluss prozessspezifischer Parameter auf die mechanischen Eigenschaften der Bauteile zu ermitteln. Zudem wird der Prozess virtuell abgebildet, um die Prozessentwicklung zu unterstützen.

Materialuntersuchungen und Verbundgießen im Analyseofen

Der am utg neu entwickelte Analyseofen deckt einen weiten Bereich der in der Gießereiforschung relevanten Randbedingungen bei der Probenherstellung und deren Charakterisierung ab. Der Grundgedanke ist die Reduzierung der Komplexität, wie sie durch Bewegung und Interaktion

von Schmelze mit Form und Einsätzen und deren Erstarrung in Wechselwirkung mit Prozessparametern und -schwankungen im Gießprozess vorhanden ist. Die Proben werden direkt für die Untersuchung im Analyseofen hergestellt und nicht aus größeren Gussteilen herausgetrennt. Durch diese konsequente Reduzierung der Abmessungen und Einflussgrößen auf den Versuch, wird es möglich, einzelne Ursache-Wirkungsketten zu separieren.

Konstruktion des Analyseofens

Der Analyseofen besteht aus einem instrumentierten Aluminiumwürfel mit einer Kantenlänge von ca. 20 cm. Modifikationen der Atmosphäre sind mittels Schutzgas und Vakuum möglich. Die Temperierung der Probe erfolgt je nach Anwendung über ein oder zwei Induktionsspulen. Somit ist es möglich, nahezu beliebige Temperaturprofile aufzuprägen und so beispielsweise Erstarrungs-

zeiten aus Abguss oder Simulation an kritischen Bauteilpositionen nachzustellen und deren Materialeigenschaften zu ermitteln.

Die folgenden beiden Beispiele zeigen die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten des neuen Analyseofens.

Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI)

In den kommenden Jahren wird der Bedarf an Gusseisen aufgrund seiner vorteilhaften Werkstoffeigenschaften in allen Bereichen des Maschinenbaus sowie in der Energietechnik und im Transportwesen weiter steigen. Dabei kann ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI) zu den zukunftsträchtigsten Gusswerkstoffen gezählt werden. Grund hierfür ist die Kombination von – für Gusseisen typischen – exzellenten gießtechnischen Eigenschaften mit den mechanischen Kennwerten von Stählen. Dies erlaubt die Produktion von Bauteilen mit hochkomplexer Geometrie, die aufgrund der geringeren Werkstoffdichte im Vergleich zu solchen aus Stahl um 10 % leichter sind.

Wärmebehandlung im Labormaßstab

Aktuell ist jedoch sowohl die Herstellung von ADI-Bauteilen als auch die Bemessung dieser mit vielen Unsicherheiten verbunden. Im neuen Analyseofen wird der zur ADI-Herstellung nötige Wärmebehandlungsprozess von Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS)

Abb. 2: Analyseofen mit Induktionsspule, Graphittiegel und Tiegelhalter, Foto: utg/Weidner

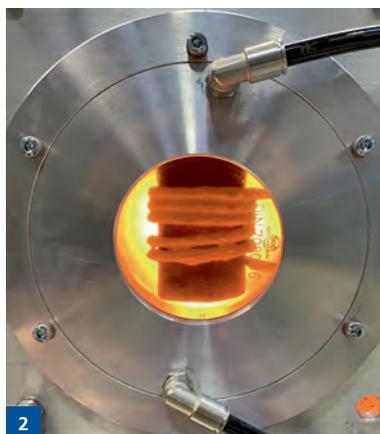




Abb. 3: Probe mit Graphittiegel für Analyseofen, Foto: utg/Hase

im Labormaßstab untersucht. Mit dem Prüfstand können anschließend die Temperaturen, Haltezeiten und Abkühlraten des Wärmebehandlungszyklus bei verschiedenen Legierungszusammensetzungen variiert werden. Durch eine entsprechende Ätzbehandlung werden daraufhin die entstandenen Gefüge sichtbar gemacht und untersucht.

Einsatz von Machine Learning

Hierfür soll ein Machine Learning Algorithmus entwickelt werden, der die einzelnen Phasenanteile automatisiert erkennen und benennen kann. Somit kann der Einfluss der verschiedenen Wärmebehandlungsparameter auf das Endprodukt bestimmt werden. Ergänzend dazu sollen die wärmebehandelten Proben auch einem Zugversuch unterzogen werden, um die mechanischen Eigenschaften zu bestimmen. So entsteht ein Bemessungskonzept für Konstrukteure von ADI-Bauteilen mit dessen Hilfe diese basierend auf den Produkthanforderungen die richtigen Wärmebehandlungsparameter, Legierungselemente und eine geeignete Bauteilgeometrie bestimmen können.

Materialmodell für die Gasentstehung

Ein weiteres Forschungsfeld, bei welchem der neue Analyseofen eingesetzt wird, ist die Untersuchung der Gasentstehung beim Gießvorgang. Für verlorene Formen und Kerne wird in der Regel gebundener Sand ver-

wendet. Während unter Verwendung von organischen Bindern im Gießvorgang toxische Abgase freigesetzt werden, entsteht beim Gießen mit anorganischem Wasserglasbinder größtenteils Wasserdampf.

Untersuchungen an anorganischen Formstoffen

Zwar sind die anorganischen Binder dadurch deutlich umweltverträglicher als deren organische Pendanten, allerdings unterscheiden sich die beiden Binderarten auch in den physikalischen Grundlagen der Gasentstehung. Bedeutsam dabei ist, in welchem zeitlichen Verlauf die Gase aus dem Formstoff freigesetzt werden. Übersteigt der Gasdruck im Kern den Gegendruck der Schmelze, entweicht das Gas nicht nur über die Kernlager, sondern auch durch die Schmelze, was zu Porosität im fertigen Gussteil führt.

Am utg wollen wir ein grundlegendes Verständnis des Zusammenhangs zwischen den Materialkennwerten anorganischer Formstoffe und der Gasfreisetzung beim Gießen schaffen. Zu diesem Zweck werden verschiede-

ne Materialparameter von anorganischen Formstoffen ermittelt. Dies erfolgt unter anderem mit eigens dafür entwickelten Versuchsaufbauten zur Bestimmung der temperaturabhängigen Gasentstehung.

Temperatur-Zeit-Profil im Analyseofen

Der Analyseofen kann Proben entsprechend eines Temperatur-Zeit-Profils temperieren. Anhand der Daten wird ein Modell entwickelt und kalibriert, mit dem der Wärmetransport im Formstoff unter Berücksichtigung der Konvektion simuliert werden kann. Basierend auf der somit errechneten Temperaturverteilung folgt die Auswertung mittels eines Metamodells, das die Vorhersage des Gasstoßes ermöglicht.

Steuerung der lokalen Binderkonzentration im Binder Jetting

Im Binder Jetting werden schichtweise Bilder in ein Pulver gedruckt.

Abb. 4: Behebung des Treppenstufeneffektes durch geometrieabhängige Binderverteilung, Foto: Fraunhofer IGCV



Abb. 5: Schwerkraftgießen mit Aluminium Schmelze,
Foto: Fraunhofer IGCV /
Andreas Heddergott



5

Der Prozess ist limitiert durch die Schichtstärke, die sowohl die Oberflächengüte als auch die Prozessgeschwindigkeit bestimmt. In einem neuen Verfahren werden graustufige Druckbilder verwendet, um sowohl Prozessgeschwindigkeiten als auch Oberflächenqualität zu steigern.

Wie jedes additive Fertigungsverfahren muss sich auch das Binder Jetting der Herausforderung stellen, wirtschaftlich mit konventionellen Prozessen zu konkurrieren. Eine der maßgeblichen Stellgrößen ist die Geschwindigkeit, die wieder wesentlich von der Schichtstärke des Prozesses abhängt. Mit größeren Schichtstärken können Bauteile schneller hergestellt werden, da für die gleiche Bauhöhe weniger Schichten benötigt werden. Mit zunehmender Schichtstärke nimmt allerdings die Oberflächenqualität der Bauteile ab. Hauptverantwortlich ist hier der sogenannte Treppenstufen-Effekt, der nicht nur die Optik, sondern auch die Performance der Bauteile beeinflusst.

Neue Graustufentechnik

Mit der neuartigen Graustufentechnik können nun zusätzliche Informationen an die Maschine übergeben

werden, sodass diese auf einem Druckraster von 63,75 Mikrometer punktgenau die benötigte Bindermenge steuern kann. Anstatt konventioneller Treppenstufen wird also der reale Übergang von Schicht zu Schicht abgebildet. Dies ermöglicht es, bisher unerreichte Oberflächenqualitäten bei Binder-Jetting-Bauteilen zu erzeugen. Zusätzlich ist die maximale Schichtstärke, die benötigt wird, um Treppenstufen zu reduzieren, deutlich größer. Der Widerspruch zwischen hoher Oberflächengüte und gleichzeitig hoher Prozessgeschwindigkeit ist damit aufgelöst.

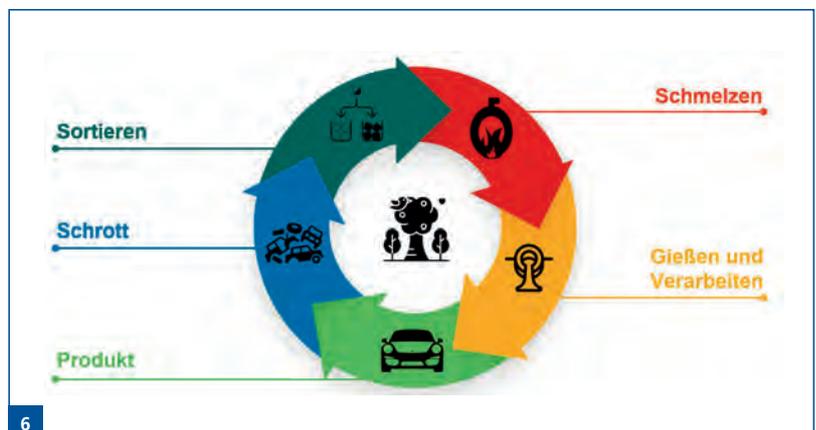
Sekundär-Aluminium im Formguss

Um die Zukunft des Aluminiums als Gusswerkstoff für hochwertige Bauteile zu sichern, muss die energieintensive Primärmetallgewinnung um ein zirkuläres Modell erweitert werden. Ein Versuch zeigt, dass sortenreine Trennung das

Erreichen einer hohen Gussqualität ermöglicht. Im Jahr 2019 wurden in Deutschland im Formgussbereich 996.100 t Aluminium verarbeitet. Allein die Herstellung des anteiligen Primärmetalls (43 Prozent) entspricht dem Stromverbrauch von 1,3 Millionen Privathaushalten.

Datenbankgestützte Sortierverfahren

Energie- und Rohstoffmärkte können auf globale Ereignisse sehr volatil reagieren. Daher ist es unabdingbar, die Weichen für ein Materialrecycling zu stellen und im Formgussbereich zu etablieren. Resiliente Stoffkreisläufe werden mit energie- und ressourcenschonenden Methoden abgestimmt. Ein „cradle-to-cradle“-Ansatz verfolgt das Ziel, Schrotte mit geeigneten Zerlege- und Sortierverfahren einer neuerlichen Anwendung direkt zugänglich zu machen. Dabei wird der CO₂-Fußabdruck um bis zu 95 Prozent reduziert und toxische



6

Abb. 6: Recycling Schema zur
Sekundär-Aluminium Gewinnung,
Foto: Fraunhofer IGCV



Abb. 7: Faserverstärkte Sandgussform nach vier Abgüssen, Foto: Fraunhofer IGCV

Prozessprodukte werden komplett vermieden. Die etablierten Sortierverfahren werden um bildverarbeitende und datenbankgestützte Systeme erweitert.

Vielversprechende Ergebnisse im Vorversuch

Im Zuge eines Vorversuchs wurde am Fraunhofer IGCV eine PKW-Felge (EN AC-ALSi7Mg0,3) zusammen mit 30 Prozent Primäraluminium eingeschmolzen und anschließend die Festigkeit der abgegossenen Probe-körper bestimmt. Die anhaftende Beschichtung wurde thermisch entfernt und die Schmelze in der Folge nach Industriestandard aufbereitet. Die metallische Ausbeute, bezogen auf den Schrotteinsatz, betrug rund 84 Prozent. Die Proben wurden nach dem Abguss wärmebehandelt, bearbeitet und geprüft.

Der Versuch zeigt, dass die Eigenschaften einer größtenteils aus Schrott hergestellten Legierung jenen einer Primärlegierung nahezu gleichwertig sind. Die Prozessroute kann im Hinblick auf Durchsatzmengen beliebig skaliert werden.

Die Zielsetzungen, einerseits die Logistikketten inklusive der Sortier-techniken weiterzuentwickeln und andererseits die Ausbeute des Metalls beim Schmelzvorgang zu erhöhen, müssen in Zeiten von Ressourcen- und Energieknappheit mit größtem Engagement verfolgt werden.

Wiederverwendbare faserverstärkte Sandgussformen

Im Rahmen des Projektes Multi-Mat-Bav-II verfolgt das Teilprojekt REINFORCED SAND die Kompetenz-erweiterung im Bereich der Multi-materialverarbeitung. Ziel ist es, die Mehrfachverwendung von verlorenen Sandgussformen zu ermöglichen.

Kokillen, auch Dauerformen genannt, werden in Großserien mit hohem Durchsatz verwendet. Da die Herstellung von Kokillen im Allgemeinen sehr zeit- und kostenintensiv ist, kommen für Mittel- und Kleinserien sowie bei Prototypen oder der Einzelfertigung mehrheitlich verlorene Formen zum Einsatz. Wesentliche Anwendungsgebiete von verlorenen Formen sind auch der Hochtemperaturguss (z.B. Eisen und Stahl) und komplexe Formen, die bei Kokillen schwierig zu erzeugen sind. Verlorene Formen werden nach dem Gießzyklus zerstört und sind daher nur für die Einmalanwendung geeignet. Dies führt unweigerlich zu einem hohen Verbrauch des Formstoffes und einem aufwendigen Recyclingprozess, da der Formstoff mit organischen oder anorganischen Bindern versetzt wird. Das Teilprojekt REINFORCED SAND hat sich deshalb das Ziel gesetzt, die Produktionskette im Sandguss umweltfreundlicher und nachhaltiger zu gestalten. Ermöglicht werden soll das durch die Wiederverwendbarkeit der Formen.

Bessere mechanische Eigenschaften durch Fasern

Die Zugabe von Fasern soll zu besseren mechanischen Eigenschaften der verlorenen Formen führen und so eine Zerstörung durch Heißverformung während des Gusses oder durch Schrumpfung des Gussteils während des Abkühlprozesses verhindern. Die Fasern im Formstoff absorbieren dabei die Verformungsenergie, sodass das spröde Bruchverhalten unverstärkter Formen in ein quasi-duktileres Verhalten umgewandelt wird. Im Projekt wird mit anorganischen Bindern gearbeitet, welche, im Gegensatz zu organischen Bindern, beim Kontakt mit der Metallschmelze ein stabiles Verhalten aufweisen und dadurch keine umwelt- und gesundheitsschädlichen Verbrennungsgase absondern.

Im Ergebnis konnten bereits erste Abgüsse faserverstärkter Formen mit Aluminium hergestellt werden. Dabei wurde gezeigt, dass faserverstärkte Sandformen beim Gießvorgang, im Unterschied zu konventionellen Formen, nicht durch Schrumpfung zerstört werden. Bei der Entformung der so hergestellten Bauteile blieben keine Sandrückstände am gegossenen Bauteil zurück.

Beim jetzigen Stand können bereits vier Abgüsse mit nur einer faserverstärkten Form erzeugt werden.





Ingenieur wissenschaften 2023

Idee, Konzeption und redaktionelle Koordination:
Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWW)



Redaktionelle Leitung: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Bildnachweis: Das jeweilige Institut; Einblendung Titel: ©Funtay – stock.adobe.com

Anzeigenverwaltung und Herstellung:

ALPHA Informationsgesellschaft mbH

Finkenstraße 10

68623 Lampertheim

Tel.: 06206 939-0

Fax: 06206 939-232

info@alphapublic.de

www.alphapublic.de

Die Informationen in diesem Magazin sind sorgfältig geprüft worden, dennoch kann keine Garantie übernommen werden. Eine Haftung für Personen-, Sach- und Vermögensschäden ist ausgeschlossen. Die einzelnen Bildquellen sind über das Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen erfragbar. Die Auskunft ist kostenfrei und kann per E-Mail erfragt werden. Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, des Vortrags, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung des Werkes oder von Teilen des Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechts der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechts.

Lampertheim, März 2023

© ALPHA Informationsgesellschaft mbH und die Autoren für ihre Beiträge

ISSN: 1618-8357

Projekt-Nr. 096-696

GIFA



12-16 June
Düsseldorf
Germany

2023

NEWCAST



GIFA

NEWCAST



The Bright World of Metals

15. Internationale
Giesserei-Fachmesse
mit Technical Forum

6. Internationale Fach-
messe für Gussprodukte
mit Newcast Forum



eco Metals
SUSTAINABLE PROCESS SOLUTIONS

NI
worldwide

GIFA und NEWCAST 2023

Der Innovationsmotor für die gesamte Gießerei-Branche. Mit der ecoMetals-Initiative für Nachhaltigkeit und Dekarbonisierung.

GIFA: Anlagen, Maschinen und Technologien aller Produktionsstufen der Gießerei.

NEWCAST: Präzision in Guss – vom Feinguss in der Medizintechnik bis zum Großbauteil für den Maschinen- und Anlagenbau.

See you in Düsseldorf!

gifa.de newcast.de tbwom.de

Messe Düsseldorf GmbH
Postfach 10 10 06 _ 40001 Düsseldorf _ Germany
Tel. +49 211 4560 01 _ Fax +49 211 4560 668
www.messe-duesseldorf.de



Messe
Düsseldorf