



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: Innovationen in Druckguss

Die Forschungsaktivitäten der Hochschule Aalen entwickeln sich weiter auf hohem Niveau. Zwischenzeitlich hat sich die Hochschule bundesweit im Bereich anwendungsorientierter Forschung im Vordergrund der Hochschulen für angewandte Wissenschaften (HAW) positioniert. Im aktuellen Förderatlas der DFG belegt sie national unter den HAW den Spitzenplatz bei DFG-Einwerbungen und ist zweitbeste HAW deutschlandweit bei Einwerbungen im Programm ZIM – Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZEW/Prognosestudie 2024). Die Spitzenposition unter den baden-württembergischen HAW auf Basis Drittmittel und Publikationsleistung pro Professor konnte im letzten Jahr erfolgreich zum achtzehnten Mal in Folge verteidigt werden.

Im letzten Jahr wurden an der Hochschule über 160 Forschungsprojekte durchgeführt. Hierfür standen insgesamt rund 15 Mio. EUR zur Verfügung. Die bereits hervorragende Forschungsinfrastruktur konnte in den Bereichen 3D-Druck, Energiespeicher und Verbundmaterialien durch Geräteeinwerbungen im Umfang von >4 Mio. EUR erneut verbessert werden. Die Forschungsaktivitäten reichten dabei von eher grundlagenorientierten Projekten mit DFG-Förderung (mehr als 10 Professoren der Hochschule mit Förderung

durch eine DFG-Sachbeihilfe) bis hin zu eher transferorientierten Projekten, darunter insgesamt rund 40 Projekten im Bundesprogramm ZIM und im Landesprogramm „Invest BW“. In 2024 starteten darüber hinaus zahlreiche neue Projekte mit Fokus auf Künstliche Intelligenz oder auf Nachhaltigkeit/ Kreislaufwirtschaft für Elektromobilität und Erneuerbare Energien. Erstmals ist die Hochschule Aalen in einem Sonderforschungsbereich der DFG unter Koordination des KIT vertreten.

Von den rund 140 wissenschaftlichen Mitarbeitenden schlossen im Jahr 2024 9 erfolgreich eine Promotion ab. Hervorzuheben ist dabei, dass die Hochschule Aalen am neu eingerichteten Promotionsverband HAW in Baden-Württemberg beteiligt ist. Mehr als 30 Professoren der Hochschule sind Mitglied im Promotionszentrum des Verbandes und können dort Promovierende eigenständig zur Promotion führen. Die mit Bundesmitteln geförderte Research Academy (Promotionskolleg und Schreibwerkstatt) an der Hochschule unterstützt dabei die überfachliche Qualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses und baut ihr Angebot kontinuierlich aus. Nachfolgend sind die Forschungsthemen des Gießereilabors der Hochschule angeführt.

Entwicklung mehrschichtiger Sandkerne für den Druckguss

Durch Erhöhung des Bindergehalts lassen sich anorganisch gebundene Sandkerne mit hoher Festigkeit und Packungsdichte herstellen, die den Bedingungen im Druckguss genügen. Nachteil ist, dass die Binderbrücken lediglich in den äußeren Bereichen des Kernquerschnittes zerfallen. Die inneren Bereiche bleiben nach wie vor hochfest, die Kerne lassen sich nur mit hohem Aufwand aus dem Gussbauteil entfernen.

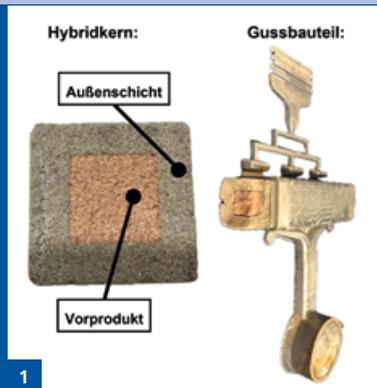
Ziel des Projektvorhabens „Entwicklung mehrschichtiger Sandkerne für den Druckguss“, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG - 505145110) ist es, hybride Sandkerne in einem zweischichtigen

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



Abb. 1: Außenschicht und Vorprodukt eines Hybridkerns hergestellt im Kernschießprozess (links); Umgossener Sandkern (rechts)



Kernschießprozess herzustellen und den Zerfall unter Druckgussbedingungen zu untersuchen. Das Forschungsvorhaben wird in Kooperation zwischen dem Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München und dem Gießereilabor der Hochschule Aalen bearbeitet.

Das Innere des hybriden Kerns, bestehend aus einer weniger festen Sand-Binder-Mischung, wird in einem zweiten Kernschießprozess mit einer hochfesten Sand-Binder-Mischung umschlossen. Die hochfeste äußere Schicht soll das Penetrationsverhalten unterbinden. Hybride Sandkerne (Abb. 1) erlauben die Lösung des Zielkonflikts zwischen Kernfestigkeit und Zerfalleigenschaft.

Im Rahmen einer Voranalyse wurde im Gießereilabor der Hochschule Aalen ein Demonstratorversuchsstand entwickelt, der den Druckgießprozess mit Wasser nachstellt. Durch die ins-

tallierte Messtechnik ist eine genaue Erfassung der während des Gießprozesses auftretenden Belastungen möglich (Abb. 2).

Zur Validierung wurde ein Druckgießwerkzeug an der Hochschule Aalen entwickelt und aufgebaut. In das speziell entwickelte Druckgießwerkzeug wurde eine verstärkte Glasscheibe integriert, um den Formfüllprozess aufzunehmen. Dazu wird eine High-Speed-Kamera eingesetzt, die den Kernzerfall in-situ aufnehmen kann. Ziel ist es den Zerfall des Sandkerns in der Druckgussform zu filmen um Randbedingungen für die Simulation zu erhalten (Abb. 3).

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. Eine zentrale Herausforderung stellt dabei die Integration innovativer Holzstrukturen in bereits bestehende Fahrzeugstrukturen dar. Untersucht wurde die thermische Beeinflussung der Holzeinlegeile beim Umgießen mit der Aluminiumlegierung AlSi10Mg(Fe)- und der Magnesiumlegierung AM50HP. Das Umgießen der Holzeinlegeile erfolgte in einem bereits bestehenden Druckgießwerkzeug. Erste Vorversuche zeigen, dass die Herstellung hybrider Holz-Aluminium- und Holz-Magnesium-Gussteile im Druckguss generell möglich ist. (Abb. 4). Die Analyse der hergestellten Probekörper mittels 3D-Computertomographie weisen eine nur geringe thermische Beeinflussung der Holzstrukturen auf. Die strukturellen Eigenschaften der Holzstruktur bleiben dabei vollständig erhalten.

Fortführende Untersuchungen mit alternativen Bauteilgeometrien (Abb. 5) sollen weitere Erkenntnisse über die innovative Produktionstechnologie liefern. Hierbei stehen Fragestellungen

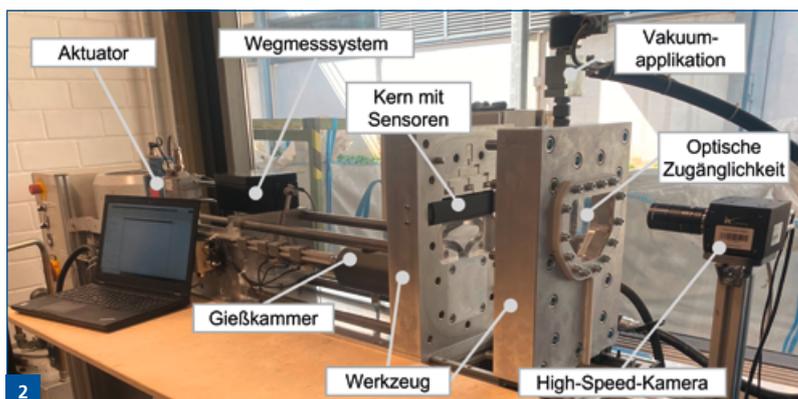


Abb. 2: Demonstratorversuchsstand mit Wasser zur Voranalyse der Kernbelastungen

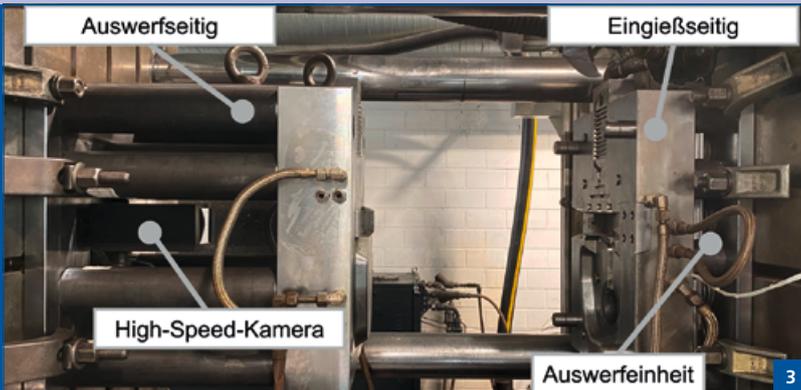


Abb. 3: Seitenansicht des Druckgießwerkzeugs mit optischer Zugänglichkeit und High-Speed-Kamera im Auswerferkasten

gen wie der Einfluss variierender Holzwerkstoffe, Prozessparameter sowie eventuell notwendige Vorbehandlungen der Holzeinlegeile im Vordergrund. Darüber hinaus sollen die hybriden Probekörper hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften und mittels metallographischer Untersuchungen analysiert werden.



Abb. 4: Fixierung der Holzeinleger im Druckgießwerkzeug (links); Hybrides Magnesium-Holz-Gussbauteil (rechts)

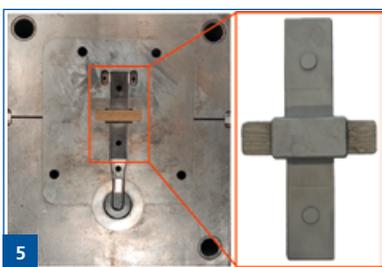


Abb. 5: Fixierung der Holzeinleger im Reckgießwerkzeug (links); Hybrides Aluminium-Holz-Gussbauteil (rechts)

Einfluss eines erhöhten Recyclinganteils einer AlSi10MnMg-Legierung

Um die globalen Klimaziele zu erreichen und den CO₂-Ausstoß zu reduzieren, gewinnen sekundäre Aluminiumlegierungen zunehmend an

Bedeutung. Der Wechsel von Primär- zu Sekundäraluminium bringt erhebliche Vorteile für die Umwelt mit sich, da im Vergleich zur Verwendung von Primäraluminium bis zu 85 % CO₂ und 95 % Energie eingespart werden können [1].

Ziel ist es, in Sekundärlegierungen Eigenschaften zu erreichen, die mit denen der Primärlegierungen vergleichbar sind. Zusammen mit der Firma Albert Handtmann Metallgusswerk GmbH & Co. KG wurde der Einfluss unterschiedlicher Gehalte an Eisen, Kupfer und Zink auf die mechanischen Eigenschaften, die Wärmeleitfähigkeit und die Korrosionsbeständigkeit untersucht (Abb. 6).

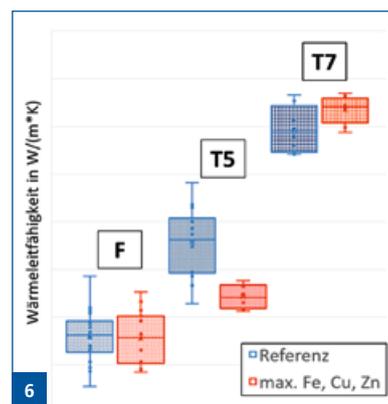


Abb. 6: Einfluss der Wärmebehandlung auf die Wärmeleitfähigkeit

Herstellung hohler Kanäle durch Gasinjektionstechnologie

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

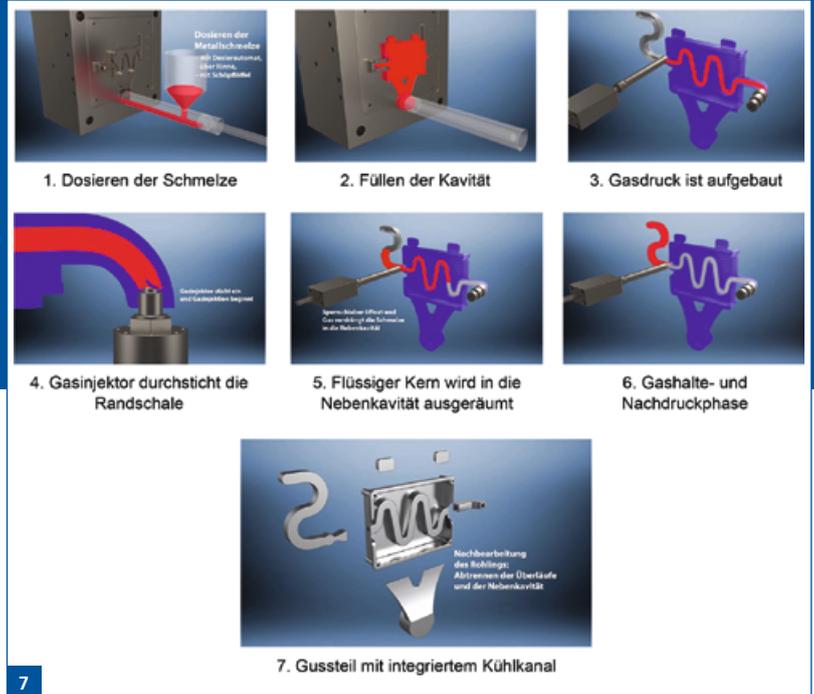
unmittelbar im Gießprozess realisierbar. Mehrteilige Baugruppen lassen sich durch ein Druckgussbauteil mit integriertem Hohlkanal substituieren.

Sobald während der Erstarrung des Gussteils eine ausreichend stark ausgeprägte Gussteilrandschale vorliegt, durchsticht ein Gasinjektor die erstarrte Gussteilrandschale. Dadurch wird das Prozessgas Stickstoff mit einem Druck von bis zu 500 bar in den flüssigen Restschmelzbereich des Gussteils eingeleitet. Die Restschmelze wird in eine sich öffnende Nebenkavität verdrängt. Dadurch wird ein definierter Hohlkanal im Gussteil erzeugt (Abb. 7).

Durch die bisherigen Forschungserkenntnisse wurde bereits erfolgreich ein großes Anwendungsfeld für dieses innovative Verfahren aufgezeigt. Die Aktivitäten im Rahmen des Projektvorhabens MAGIT beziehen sich weniger auf Forschungsaktivitäten im Labormaßstab, sondern vielmehr auf die Weiterentwicklung des MAGIT-Prozesses zur prozesssicheren Grobserientauglichkeit im industriellen Gießereiumfeld. Neben der in der Abb. 8 dargestellten Kühlgehäusegeometrie wurden bereits Untersuchungen an weiteren Demonstratorbauteilen und Gießversuche mit Gussteilen aus dem industriellen Umfeld durchgeführt.

Bei AlSi-Druckgusslegierungen wurde mit zunehmendem Erstarrungsintervall eine größere Abhängigkeit der Oberflächenqualität von dem injizierten

Abb. 7: Schematische Darstellung zum Ablauf des Gasinjektionsprozesses im Druckgießverfahren



Gasdruck festgestellt (Abb. 9). Raue und ungleichmäßige Oberflächenstrukturen treten bei einem geringen Gasdruck auf. Besonders bei AlSi-Druckgusslegierungen mit großem Erstarrungsintervall reicht der geringe Gasdruck nicht aus, um die teilerstarrten Bereiche vollständig aus dem Hohlkanal zu verdrängen. Eine glatte und gleichmäßige Oberfläche wird mit einem hohen Gasdruck erreicht.

Im Rahmen des Projektvorhabens MAGIT wurde die Gasinjektionsanlagen-technik optimiert. Das MAGIT-Powermodul lässt sich als industrietaugliches Peripheriegerät an Kalt- und Warmkammerdruckgießmaschinen adaptieren. (www.magit-hpdc.com)

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

Leichtbaustrukturen aus Guss spielen eine entscheidende Rolle in der Entwicklung, Konstruktion und Produk-

tion von Fahrzeugkomponenten. Das Projekt InDrutec-E (Innovationsführerschaft bei Druckgusstechnologien für die Elektromobilität – neue Werkstoffe, Herstellverfahren und Anwendungen) zielt darauf ab, durch innovative Entwicklungen die Technologieführerschaft im Bereich des Druckgusses von Leichtmetalllegierungen für die Elektromobilität zu erlangen. Für die geänderten Anforderungsprofile des elektrischen Antriebsstrangs werden neue, optimierte Werkstoff- und Herstellprozessinnovationen entwickelt. Im Fokus dieses Forschungsvorhabens stehen Aluminium- und Magnesiumlegierungen mit hohen mechanischen Kennwerten (Abb. 10), die durch Reduktion der Wandstärke hohes Einsparpotential des Gewichts und der CO₂-Emissionen erwarten lassen.

Die Weiterentwicklung des Vacural®-Druckgießverfahrens ist ein zentraler Forschungsschwerpunkt der Hochschule Aalen. Gemeinsam mit dem Projektpartner Oskar Frech GmbH wurden die kritischen Punkte des Verfahrens identifiziert. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde das Demonstratorbauteil – ein Getriebedeckel – mit einer optimalen Auslegung und Gestaltung entwickelt.

Dabei kam eine innovative, kraftfluss-optimierte Konstruktionsmethode zum Einsatz, die das Bauteil gegenüber einem Referenzmodell deutlich erleichtert. Dabei legte das Institut für Fahrzeugkonzepte (FK) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wert darauf, dass bei gleichbleibender Wandstärkenverteilung und optimierter Rippen höchste Kräfte des Getriebes übertragen werden.

Die Herstellung der Gussprototypen erfolgt mit Aluminium- und Magnesiumlegierungen, wofür zwei verschiedene Werkzeugeinsätze in Kooperation mit der Firma Oskar Frech GmbH entwickelt und hergestellt wurden. Gegenüber einem funktionsgleichen Aluminiumreferenzbauteil konnte das Gewicht in der optimier-

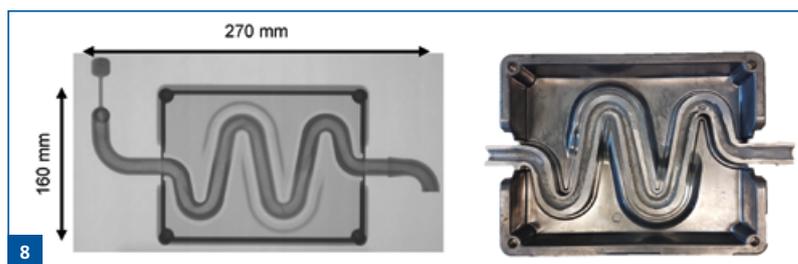


Abb. 8: Kühlhäuse mit einem durch Gasinjektionstechnologie hergestellten Hohlkanal: (Kanaldurchmesser 10 mm, Kanallänge 420 mm): Röntgenaufnahme (links), Ansicht im Frähschnitt (rechts)

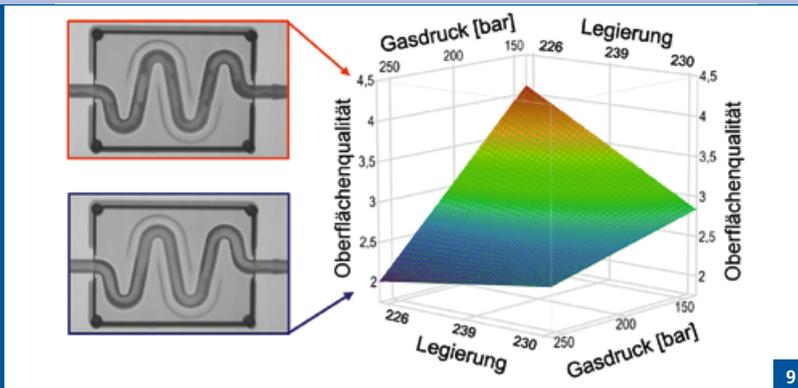
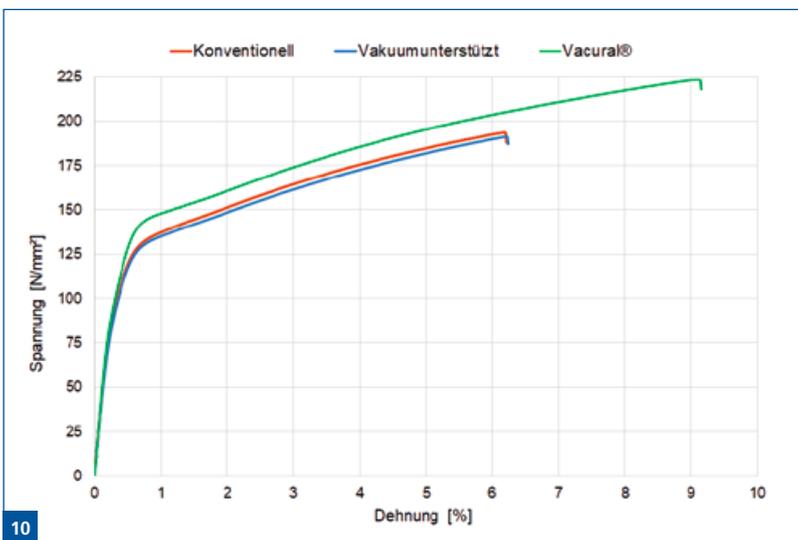


Abb. 9: Oberflächenqualität des Hohlkanals in Abhängigkeit von der verwendeten AlSi-Druckgusslegierung und des injizierten Gasdrucks

9



10

Abb. 10: Gegenüberstellung der mechanischen Eigenschaften von Zugproben aus der Magnesiumlegierung AS31 in Abhängigkeit des Gießverfahrens

ten Aluminiumvariante um 34 Prozent, in der Magnesiumvariante sogar um 51 Prozent gesenkt werden (Abb. 11). Der Einsatz einer eigens entwickelten Sekundäraluminiumlegierung führte zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen um 86 Prozent. Auch die Emissionen der Mg-Variante wurden durch den Leichtbaueffekt und den Einsatz von grünem Magnesium mit 63 Prozent deutlich reduziert. [2]

Das Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) mit dem Förderkennzeichen 03LB2004F gefördert. Im Projekt arbeiten die Unternehmen Robert Bosch GmbH, Oskar Frech GmbH und Co. KG und die Gühring KG gemeinsam mit dem DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte

und dem Gießereilabor der Hochschule Aalen an den technologischen Entwicklungen. Die Partner wurden für ihre innovative Entwicklung mit dem Award of Excellence der Internationalen Magnesium Association ausgezeichnet.

Zynk-Guss

Zink-Druckgusslegierungen werden heute in verschiedenen Industrie-



11

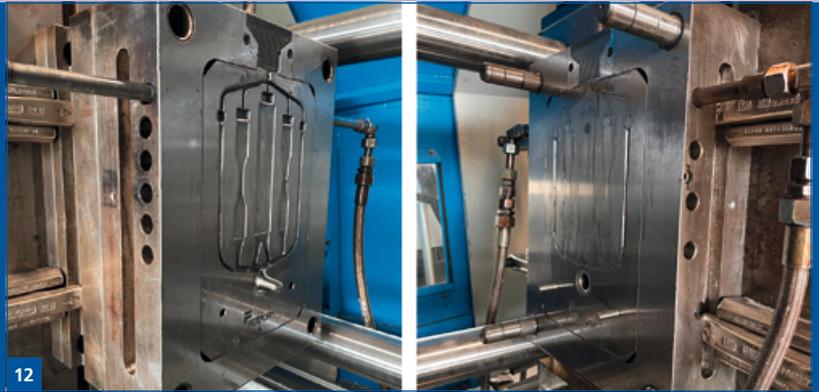
zweigen aufgrund ihrer hohen Oberflächen- und Bauteilqualität für quasistatische oder niederzyklische Anwendungen verwendet. Das Warmkammer-Druckgießverfahren spielt dabei aufgrund seiner kurzen Zykluszeiten und hohen Produktivität eine wichtige Rolle. Allerdings werden Zink-Druckgusslegierungen aufgrund fehlender Kennwerte und Bemessungsmethoden für die Beschreibung des zyklischen Werkstoffverhaltens selten für zyklisch hochbelastete Bauteile eingesetzt.

Ziel des Projektes „Analyse des quasistatischen und zyklischen Werkstoffverhaltens von modernen Zinkdruckgusslegierungen zur Feststellung der Werkstoffeignung für zyklisch beanspruchte Bauteile unter Berücksichtigung spannungs-mechanischer, technologischer und statistischer Größeneinflüsse (AIF/IGF Vorhaben Nr.: 21900N)“ ist die Beschreibung des zyklischen Werkstoffverhaltens der Zink-Druckgusslegierungen Z400, Z410 und Z430 sowie der aluminiumreicheren Zinklegierung ZEP unter Berücksichtigung von geometrischen, statistischen und technologischen Größeneinflüssen sowie der Werkstoffalterung.

Um eine Grundlage zur Abschätzung des Bauteilverhaltens unter zyklischer

Abb. 11: Optimiertes Gussbauteil abgegossen im Vacural®-Druckguss mit einer hochfesten Aluminium-Recyclinglegierung

Abb. 12: Druckgießwerkzeug zur Herstellung von ungekerbten und mild gekerbten Flachproben



Beanspruchung zu schaffen, wurde das zyklische Werkstoffverhalten für verschiedene Zinklegierungen ermittelt und mit der lokalen Mikrostruktur abgeglichen. Den größten Einfluss auf die Schwingfestigkeit scheinen durch den Druckgießprozess induzierte oberflächennahe Fehlstellen zu haben; diese entstehen vor allem bei niedrigeren Werkzeugtemperaturen.

Für die Untersuchungen wurden endkonturnahe Flachproben mit unterschiedlichen Gefügestrukturen unter Variation der Wandstärke, Werkzeugtemperatur und Anschnittgeschwindigkeit abgegossen (Abb. 12). Das zyklische Werkstoffverhalten wurde anhand spannungsgeregelter Schwingfestigkeitsversuche ermittelt. Die Ergebnisse der zyklischen Materialuntersuchungen in Abhängigkeit der Wandstärke, der Werkzeugtemperatur und der Anschnittgeschwindigkeit sind in Abb. 13 dargestellt. Die Darstellung der Schwingfestigkeit über der Wandstärke der Proben verdeutlicht, dass die Werte der ertragbaren Spannungsamplitude der Proben mit $t = 0,8$ mm über einen deutlich größeren Bereich verteilt sind als bei Proben mit $t = 3$ mm. Der Unterschied zwischen der höchsten und niedrigsten ertragbaren Spannungsamplitude beträgt 37 %. Ansonsten scheint die Wandstärke keinen signifikanten Effekt auf die Schwingfestigkeit zu haben.

Für die Variation der Werkzeugtemperatur lässt sich eine Zunahme der

ertragbaren Spannung beobachten. Dieser Effekt ist allerdings nur bei Proben mit einer Wandstärke von $t = 0,8$ mm ausgeprägt. Die Anschnittgeschwindigkeit scheint keinen signifikanten Effekt auf die Schwingfestigkeit zu haben. Auch die Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen bestätigen die Annahme, dass das Versagen der Proben unter zyklischer Belastung hauptsächlich durch oberflächennahe Gussfehler eingeleitet wird.

Das IGF-Vorhaben 21900N 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.

ZiBe3: Einfluss des Wasserstoff-Eintrags auf die galvanische Beschichtbarkeit von Zinkdruckguss

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

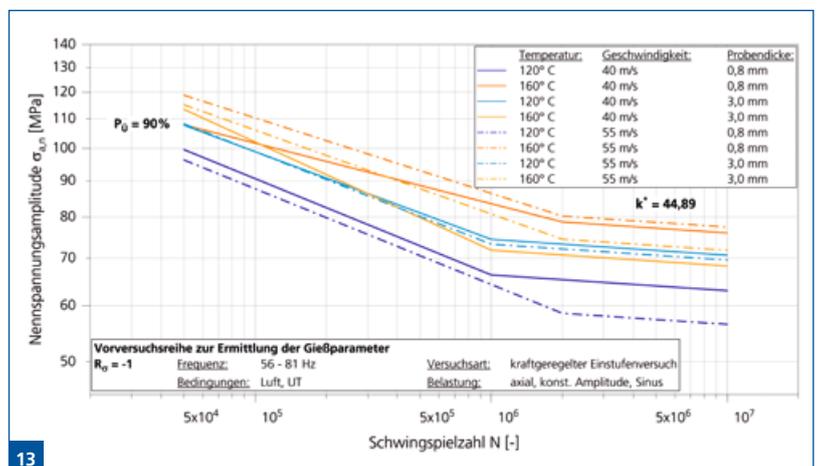


Abb. 13: Wöhlerlinien für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P\bar{U} = 90\%$

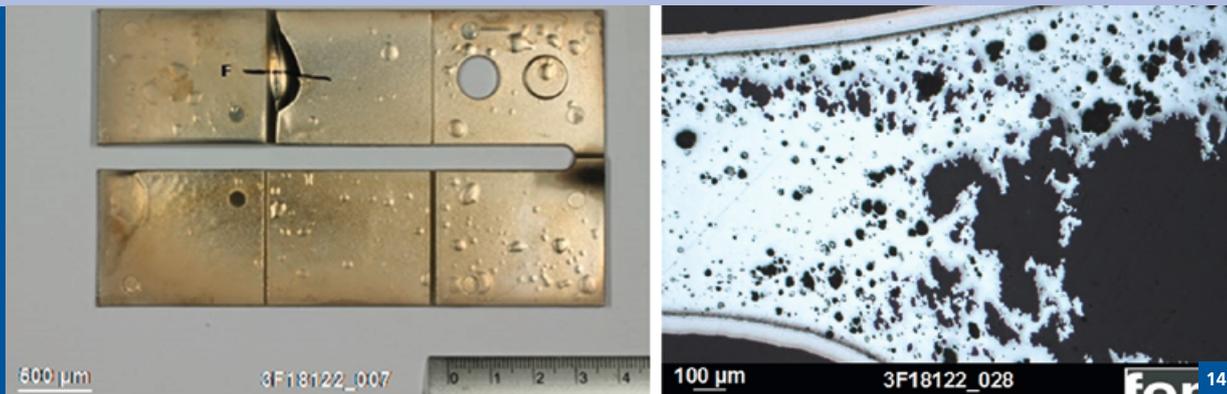


Abb. 14: Übersichtsaufnahme und Querschliff einer beschichteten Probe (Trennmittel 1, gealtert, Kunststoffgestrahlt, cyanidischer Kupferelektrolyt), Schlitzebene mit „F“ gekennzeichnet

Wasserstoff während der Vorbehandlungs- und Beschichtungsprozesse Ursache für die Blasenbildung von galvanisiertem Zinkdruckguss sein kann (Abb. 14). Dabei deuten sich Unterschiede in Abhängigkeit von der Gusshaut-Struktur und deren Zusammensetzung an.

Die systematische Untersuchung der Rolle des Wasserstoffs, die bisher nicht im Fokus der F&E-Aktivitäten stand, wird im Rahmen des Folgeprojektes ZiBe3 „Einfluss des Wasserstoff-Eintrags auf die galvanische Beschichtbarkeit von Zinkdruckguss und Entwicklung von Maßnahmen zur Vermeidung“ (AiF/IGF-Vorhaben-Nr. 22574 N/2) zusammen mit dem Forschungsinstitut für Edelmetalle und Metallchemie (fem) untersucht.

Bislang ist die Löslichkeit und Speicherung von Wasserstoff in Zinkdruckgusslegierungen kaum erforscht. Da gängige Zinkdruckgusslegierungen einen erheblichen Anteil an Legierungselementen aufweisen können, ist dort von einer gewissen Wasserstofflöslichkeit in Abhängigkeit von den

Legierungselementen auszugehen. Anhand von ersten Heißgasextraktionsanalysen (Abb. 15) konnte bereits nachgewiesen werden, dass der Anteil an Wasserstoff, der in einer Probe gespeichert werden kann, in Abhängigkeit vom Fließweg der Schmelze deutlich ansteigt. Vor allem in den angussfernen Bereichen einer Probe steigt der gemessene Wasserstoffaustritt an, was vermutlich auf eine höhere Wahrscheinlichkeit an Gussfehlern zurückzuführen ist.

Aus diesen Ergebnissen sollen am Ende Prozessempfehlungen abgeleitet werden, die dem Hersteller von Druckgussteilen die Herstellung von Bauteilen ermöglicht, die „unempfindlich“ gegenüber der Wasserstoffaufnahme sind und damit 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 Bundesta-

tes gefördert und vom Projektbegleitenden Ausschuss durch Sach- und Beratungsleistungen unterstützt.

Literatur

- [1] RECYCLING magazin – Trends, Analysen, Meinungen und Fakten zur Kreislaufwirtschaft 02/2022
- [2] DLR, Vortrag Dr. Beeh, Euroguss 2024

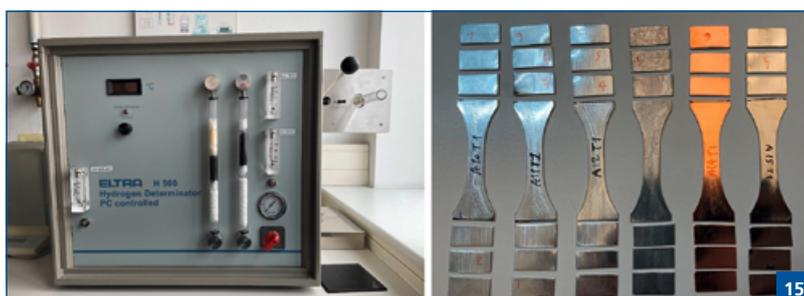


Abb. 15: Heißgasextraktionsmessgerät (links); Versuchsprouben zur Bestimmung des diffusiblen Wasserstoffanteils an jeder Reinigungs- und Beschichtungsfolge (rechts)