

Trends und Herausforderungen für die deutsche Gießerei-Industrie aus Sicht der akademischen Forschung

Was bedeutet Industrie 4.0 in der Gießereitechnik? Anhand von vier Beispielen aus dem akademischen Forschungsumfeld wird gezeigt, dass Industrie 4.0 in der Gießereitechnik keine fertigungstechnische Revolution, sondern die konsequente Weiterentwicklung der bereits begonnenen durchgängigen digitalen Produktionsplanung ist.

Von Wolfram Volk, Benjamin Griebel und Florian Ettemeyer, München, Martin Fehlbier und Lionel Reiche, Kassel, Dierk Hartmann, Kempten, Lothar H. Kallien und Martina Winkler, Aalen

Industrie 4.0

Der Begriff Industrie 4.0 wird oftmals im Kontext mit dem "Internet der Dinge" oder auch der "smarten Produktion" genannt. Aber was bedeutet Industrie 4.0 wirklich? Zusammengefasst kann die Industrie 4.0 als intelligente Vernetzung von Prozessen und Daten beschrieben werden, um durch intelligente Regelung einen Produktionsprozess mit optimalem Output zu generieren.

Durch interne Datenerfassung ist es möglich, mit Prozessdaten von Sensoren und Aktoren einen digitalen Schatten (engl. "Digital Shadow") des realen Prozesses zu erstellen. Mittels mathematischer Modellierung kann aus dem digitalen Schatten ein digitaler Zwilling (engl. "Digital Twin") des Systems generiert werden, der Prognosen über die zu erwartende Bauteilqualität zulässt. Die erhebliche Datenvielfalt und -menge ("Big Data") durch Echtzeitaufnahmen gilt es passend zu strukturieren, sodass das Modell beispielsweise durch den Einsatz von Erfahrungsdatenbanken stetig verbessert wird und es durch frühzeitige Einleitung von Regelmaßnahmen zur Sicherung der Bauteilgualität und der Prozessführung kommt (vgl. Bild 1).

Im Folgenden wird der Einsatz von Industrie 4.0 anhand von vier Beispielen aus dem akademischen Forschungsumfeld näher erläutert.

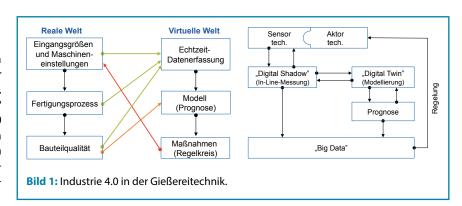
Anwendungsbeispiele aus dem akademischen Umfeld

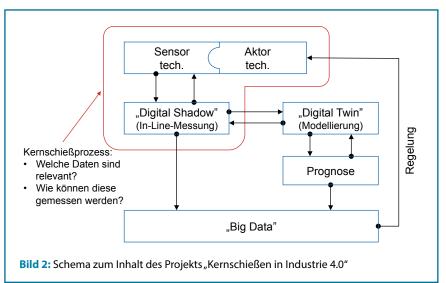
Kernschießen in Industrie 4.01)

Motivation und Zielsetzung

Die Steuerung der Kernherstellung basiert in den allermeisten Fällen ausschließlich auf Erfahrungswissen und der Methode "Trial & Error". Bei Anpassungen mit diesen Methoden besteht die Gefahr, dass veränderte Parameter Auswirkungen an nicht beobachteten Stellen des Systems haben. So wird der Fehler an einer Stelle behoben und tritt eventuell an anderer wieder zu Tage. Speziell bei der Fertigung hochkomplexer Motorkomponenten in der Automobil-Industrie mit anorganisch gebundenen Sandkernen sind die Anforderungen an den Formstoff entsprechend hoch. Die Steuerung der Kernfertigungsprozesse ist daher von besonderem Interesse, um eine gleichbleibende Gussteilqualität sicherzustellen.

Daraus leitet sich die Zielsetzung des Projekts ab: Die Analyse der Wirkzusammenhänge in der Prozesskette vom Formgrundstoff bis hin zum fertigen Gussbauteil (Bild 2).







Vorgehensweise

Die Kette vom Formgrundstoff über die Kernherstellung, die Lagerung bis hin zum Abießen und der Entkernung ist lang und in ihrer Gänze schwer zu fassen. Daher wird sie in diesem Projekt in zwei Teilschritte zerlegt (Bild 3).

Der erste Schritt betrifft die Prozessparameter und die Kerneigenschaften. Der Begriff Prozessparameter umfasst dabei die Eigenschaften der Grundstoffe, die Rezeptur der Mischung und schließlich die Parameter bei der Kernherstellung wie Schießdruck und Werkzeugtemperatur. Die Kerneigenschaften werden von den Größen Dichte, Gasdurchlässigkeit, Festigkeit, Kernfeuchte und thermische Stabilität beschrieben. Der zweite Schritt beschreibt die Zusammenhänge zwischen diesen Kerneigenschaften und der Ausprägung auftretender Gussfehler. In diesem Projektteil werden Fehler durch Kerngas, Fehler durch Kernverformung und Fehler auf Grund von Sandanhaftungen bzw. Penetration untersucht.

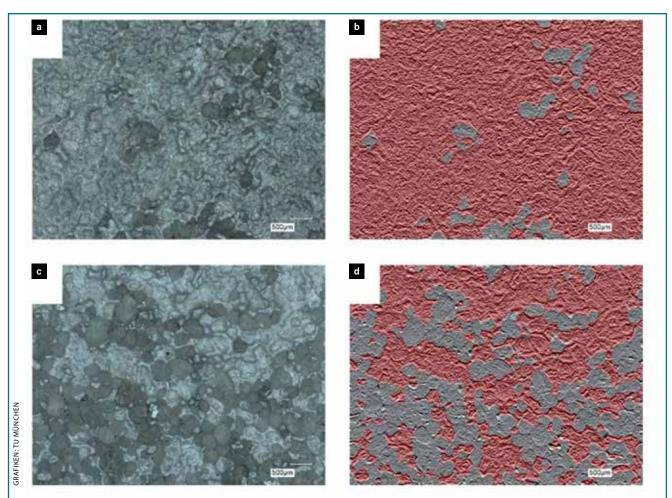
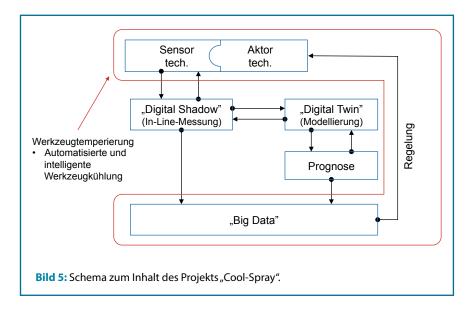


Bild 4: Vergleich von Aufnahmen penetrierter Gussoberflächen (a, c) mit den Falschfarbenbildern der Bildverarbeitung (b, d). In den Falschfarbenaufnahmen ist Aluminium rot und Sand grau eingefärbt. Die Darstellungen a und b entsprechen einer Sandbedeckung von 7 %, die Bilder c, d einer Sandbedeckung von 46 %.



Zur Analyse des ersten Schrittes wird ein teilfaktorieller Versuchsplan abgefahren. Dieser wurde mit Hilfe von "Design-of-Experiment (DoE)"-Methoden entwickelt und ermöglicht die Ana-

lyse der Haupteffekte und der wichtigsten Wechselwirkungen. Durch die Ergebnisse dieser Versuchsreihe können mathematische Modelle erstellt werden, welche die Veränderung der Kerneigenschaften bei gegebener Veränderung der Prozessparameter vorhersagt.

Während für den ersten Schritt teilweise auf vorhandene Prüfmethodik zurückgegriffen werden konnte, gilt es für den zweiten Schritt, komplett neue Methoden zu entwickeln. Es wird eine Prüfkokille entwickelt, welche die behandelten Gussfehler abbildet und quantifizierbar macht. Im Falle der Penetration wird beispielsweise eine einfache Kerngeometrie mit einstellbarem hydrostatischem Druck abgegossen. Nach dem Entkernen wird ein Bild der Gussteiloberfläche aufgenommen und mit

Hilfe der digitalen Bildverarbeitung die mit Sand bedeckte Fläche ermittelt. **Bild 4** zeigt eine Aufnahme und das Falschfarbenbild der Bildverarbeitung für eine Oberfläche mit 7 % Sand-

Wirtschaftlichkeit Reduktion der Taktzeit Einsparung von Strom und Wasser



Effizientere Kühlung Bis zu 10-fach besseres a größere Übertragungsfläche geregelte Kühlung (T, t) neue Formwerkstoffe

Bild 6: Vorteile des Kühlkonzepts "Cool-Spray".

Qualitätssteigerung

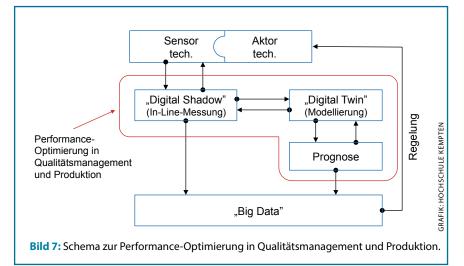
gezielte Temperierung

geringere Porosität

Steuer-, regelbare Kühlung

verbesserte Nachspeisung

Energie- und Ressourceneffizienz Entfall/Reduzierung externer Sprühprozess Entfall Temperiergeräte Wärmerückgewinnung



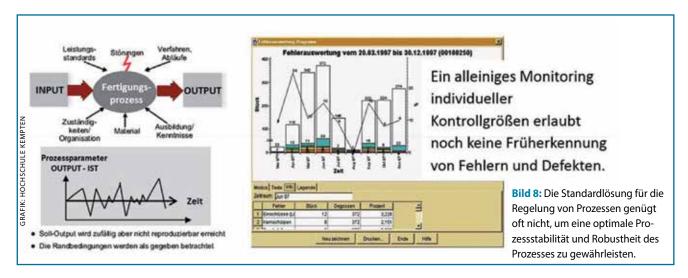
bedeckung und eine mit 46 % Sandbedeckung.

GRAFIK: UNIVERSITÄT KASSEL

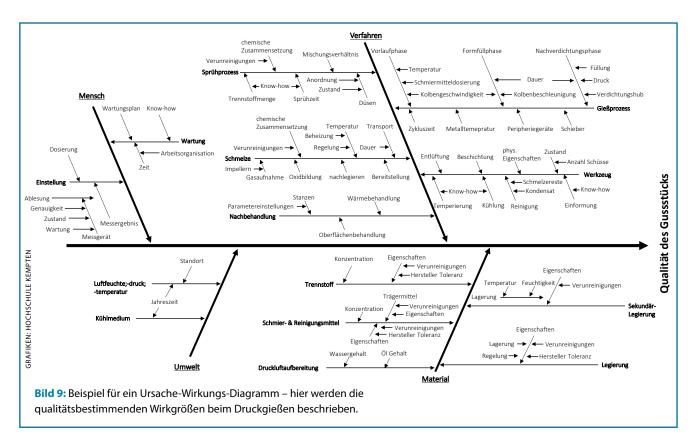
Auf der Basis der entwickelten Prüfmethoden wird wieder ein DoE-Versuchsplan geprüft, um die Einflüsse von Kerneigenschaften auf die Ausprägung von Gussfehlern zu analysieren.

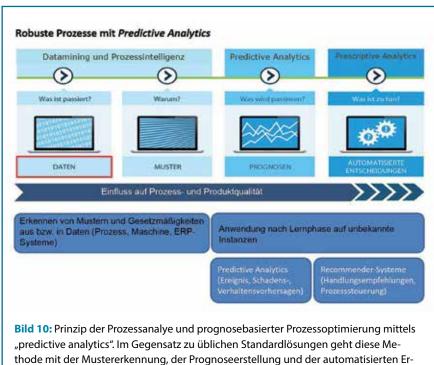
Zusammenfassung

Bei der Steuerung des komplexen Kernherstellungsprozesses stoßen Trial & Error-Methoden an ihre Grenzen, da Wechselwirkungen und unerwartete Effekte meist nicht beobachtet werden. Mit Hilfe von DoE-Methoden werden in die-



33





stellung von Handlungsanweisungen und Prozessteuersignalen weit über die klas-

sische Datenerfassung und regressionsbasierte Datenbewertung hinaus.

sem Projekt die Wirkzusammenhänge in der Prozesskette der Kernherstellung systematisch analysiert und Vorhersagemodelle abgeleitet. Auf der Basis dieser Modelle wird eine sichere und effiziente Prozesssteuerung möglich.

Werkzeugtemperierung in Industrie 4.0²⁾ – Projekt "Cool-Spray"

In Zusammenarbeit mit dem Industrie-Förderkreis "Innovativer Leichtbau" entwickelt das Fachgebiet Gießereitechnik (GTK) der Universität Kassel ein gänzlich neues innovatives Kühlkonzept für Guss-Dauerformen. Das Ziel des Kühlkonzepts ist es, eine gezielte und effektive Kühlung zu gewährleisten, die eine gerichtete Erstarrung im Gussteil ermöglicht. Durch eine gerichtete Erstarrung und damit einer optimierten Nachspeisung können Porosität verringert und die Qualität des Bauteils verbessert werden. Auch Hot-Spots können durch das Konzept separat und intensiver gekühlt werden.

Hierbei ist die Form intelligent ausgeführt, sodass sie selbständig auf verschiedene Änderungen der Temperieranforderungen reagieren kann und die Kühlung dementsprechend anpasst. Für die Intelligenz der Form sind in dieser Temperatursensoren verbaut, die eine kontinuierliche Überwachung der Formtemperatur gewährleisten. Über die sehr detaillierte Formtemperaturerfassung

können so auch eventuell weitere Erkenntnisse über das Verhalten der Form gewonnen werden. Durch die stark verbesserte Kühlleistung soll auf externe Kühlmethoden, wie beispielsweise das Sprühen im Druckgießverfahren, verzichtet werden. Außer-

dem lassen sich die oft sehr energieintensiven Temperiergeräte einsparen. Vor dem Hintergrund der Energieeffizienzsteigerung in Gießereien ist in dem Kühlkonzept eine Wärmerückgewinnung integriert. Hierbei soll ein Teil der durch die Schmelze eingebrachten Energie zurückgewonnen werden. Das Ziel einer Rückgewinnung von 50 % konnte in Voruntersuchungen am Prüfstand bereits nachgewiesen werden, die Ergebnisse an einer realen Anlage stehen noch aus (Bild 6). Das Kühlkonzept wurde bereits an einer Testkokille umgesetzt. Die ersten Ergebnisse sind sehr vielversprechend. Die Kühlung konnte stark verbessert und individuell auf verschieden Bereiche der Form angepasst werden.

Weitere geplante Projekte sind der Einsatz in der gesamten Druckgießform (auch Serienform) sowie in einem Druckgießformeinsatz.

Performance-Optimierung in Qualitätsmanagement und Produktion³⁾

Einer der wesentlichen Bausteine zur Sicherung technisch-wirtschaftlicher Wettbewerbskompetenz in der Prozessindustrie ist die Beherrschung sicherer und robuster Prozesse. Um dies in der heute geforderten Konsequenz zu realisieren, müssen Produkt- und Prozessplanung mit simulationsbasierten, virtuellen Methoden entwickelt werden. Unabdingbar ist es, Möglichkeiten adaptiver Steuerung und Regelung von Prozessen auf der Basis wissensbasierter Methoden und deren intelligenter Verknüpfung so zu entwickeln, dass die Anforderungen der komplexen und heterogenen Produktionssysteme in Gießereien erfüllt werden können.

Gießereifertigungen werden heute standardmäßig statisch gesteuert, eine intelligente Vernetzung der Teilprozesse fehlt. Damit können die Anforderungen an eine stabile und robuste Regelung des Gesamtprozesses nicht erfüllt werden. Insbe-

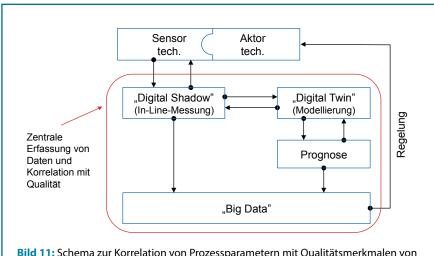
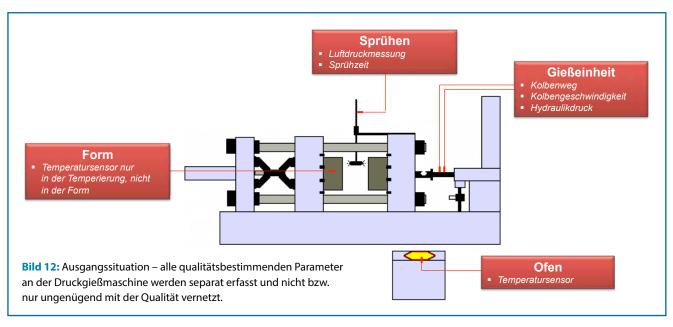


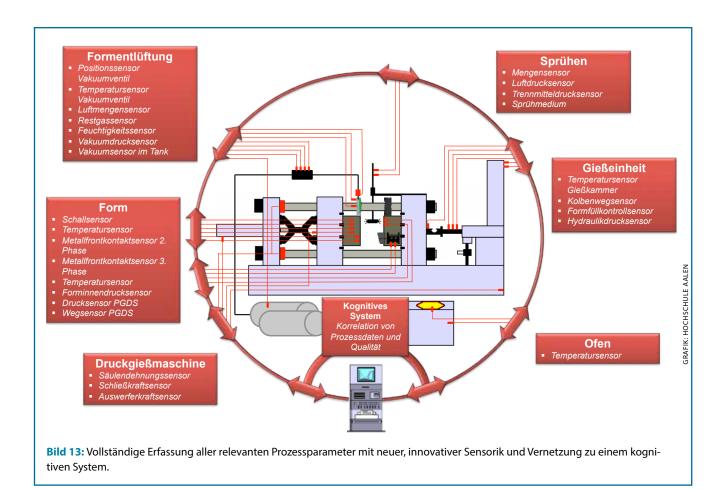
Bild 11: Schema zur Korrelation von Prozessparametern mit Qualitätsmerkmalen von Druckgussteilen.

sondere können wechselseitige, multivariate Abhängigkeiten und Wirkweisen nicht berücksichtigt werden (Bild 8).

Nahezu klassisch ist das Problem, dass sich alle Kontrollund Steuergrößen innerhalb der vorgegebenen Spezifikation befinden und es trotzdem zu nicht erklärbaren Problemen (z. B. Ausschuss) kommt. Letzten Endes bedeutet dies, dass ein alleiniges Monitoring individueller Kontrollgrößen noch keine Früherkennung von Fehlern und Defekten erlaubt. Für Gießereiprozesse gibt es bisher noch keine Lösungen, um Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge (vgl. Bild 9) im Detail prozessübergreifend zu erkennen, es fehlt auch die Möglichkeit, das Prozessverhalten in Abhängigkeit des aktuellen Prozesszustandes in Echtzeit zu regeln.

Die Hochschule Kempten hat hier gemeinsam mit der Universität Duisburg-Essen auf der Grundlage von "predictive analytics" eine softwaregestützte Methode (EIDOdata) entwickelt, mit der Unternehmens-, Betriebs-, Fertigungs- und Prozessdaten unterschiedlichster Art analysiert werden können (Bild 10). Diese Art der Prozessanalyse nutzt also das Poten-





zial produktiver Daten und erkennt bei geeigneter Datenbasis ursächliche Zusammenhänge, neue bzw. unerkannte Korrelationen und Muster zwischen den im realen Prozess gemessenen Qualitätskennwerten und den entsprechenden auslösenden Parametern. Dabei enthält diese Datenbasis implizit das gesamte Prozesswissen der Gießerei und damit auch den Einfluss nichtgemessener oder nichtberücksichtigter Parameter. Dieses Wissen wird von der verwendeten Software gelernt. Mittels spezieller Prognosemethoden ist es möglich, Prozessergebnisse (z. B. Qualitätsmerkmale) im laufenden Prozess vorherzusagen oder mit Methoden der Rückwärtsanalyse die ge-

sungen oder Steuersignale im Hinblick auf eine optimale und robuste Prozessführung verfügbar gemacht werden (Bild 10). Korrelation von Prozessparametern mit Qualitätsmerkmalen bei Druckgussteilen⁴⁾

eigneten Prozesseinstellungen für ein optimales Prozessergebnis

zu ermitteln. Eine individuell an unterschiedlichste Gießereisitu-

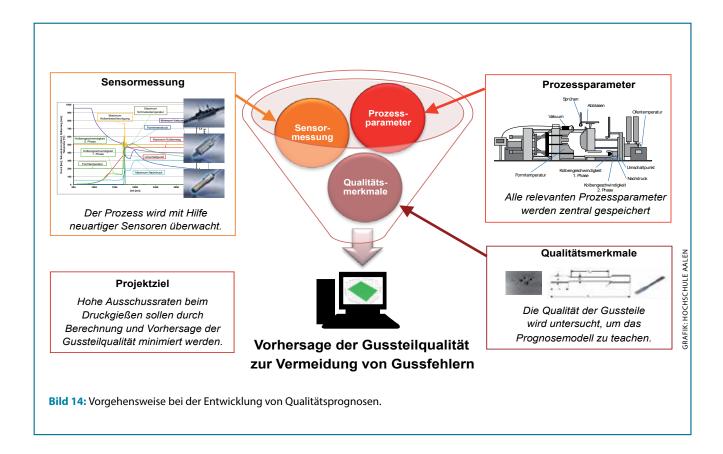
ationen anpassbare Wissensdatenbank (Recommendersystem)

verarbeitet die Analyseergebnisse so, dass Handlungsanwei-

Im Aluminium-Druckgießverfahren steigen die Anforderungen und die Komplexität der damit gefertigten Gussteile. Die Herausforderung ist die Einhaltung hoher Qualitätsstandards trotz der unzähligen Parameter, welche die Qualität der Gussteile beeinflussen (Bilder 11). Die Wechselwirkung aller qualitätsrelevanten Einflussfaktoren führt zu hohen Ausschussraten von 10 bis 25 %.

Die Prozessparameter der Druckgießmaschine, des Ofens und der Peripheriegeräte wie Temperiersystem und Sprühroboter werden separat eingestellt und nur teilweise aufgezeichnet (Bild 12). Aufgezeichnete Parameter können jedoch nicht den Druckgussteilen zugeordnet werden, da aufgrund der fehlenden automatisierten Markierung keine Verknüpfung der Schusskurve zum Gussteil möglich ist. Die typischen Parameter, die aufgezeichnet werden, sind unter anderem die Kolbengeschwindigkeit in der ersten und zweiten Phase und der Maschinendruck. Allerdings gibt es weitaus mehr Parameter wie beispielsweise die Feuchtigkeit der evakuierten Luft, welche die Qualität ebenso beeinflussen.

ANZEIGE 85 x 62 **Klumpf**



Das europäische Forschungsvorhaben MUSIC (MUlti-layers control and cognitive system to drive metal and plastic production line for injected components) hat die Reduzierung der Ausschussraten durch die Entwicklung eines intelligenten kognitiven Systems, welches alle qualitätsrelevanten Prozessparameter berücksichtigt, zum Ziel, Bild 13.

Im Gießereilabor der Hochschule Aalen wurde hierzu ein Gussteil entwickelt, mit dem die unterschiedlichsten Gussfehler wie Schwindungslunker, Gasporositäten und Kaltlauf hergestellt und untersucht werden können. Die Form ist mit vielen neuen, innovativen Sensoren ausgestattet, welche zusätzliche Prozessparameter wie beispielsweise die Beschleunigung des Kolbens aufzeichnen und bisher noch nicht verwendet wurden. Dadurch sollen mehr Informationen über den Gießvorgang und die Umgebungsbedingungen gesammelt werden, um Einflussfaktoren, die bisher noch nicht berücksichtigt wurden, aufzunehmen. Im Sinne der Industrie 4.0 werden die Sensoren zu einem intelligenten Sensornetzwerk verbunden. In die Vernetzung werden auch die Druckgießmaschine und die Peripheriegeräte eingebunden. So können alle qualitätsbestimmenden Parameter zusammen in einer Datenbank abgelegt werden. Durch die Markierung der Gussteile können die erfassten Daten eindeutig den Gussteilen zugeordnet werden.

In einigen Versuchen wurden bereits Prozessgrößen gesammelt, und die Qualität der Gussteile wurde hinsichtlich Dichte, Verzug und mechanischer Eigenschaften untersucht. Die Sensormessungen und die Prozessparameter der Druckgießmaschine und der Peripheriegeräte wurden aufbereitet und zusammen mit den Qualitätsdaten der Gussteile in einer gemeinsamen Datenbank gespeichert. Diese Daten bilden die Grundlage für die Entwicklung eines Prognosemodells durch Auswertealgorithmen, die im Bereich des Data-Minings ver-

wendet werden (**Bild 14**). Anhand des Modells soll die Gussteilqualität noch vor dem Auswerfen vorhergesagt werden. Durch die im Projekt gewonnene erweiterte Prozesskenntnis und die Vorhersage der Gussteilqualität soll die Ausschussrate im Druckgießprozess deutlich reduziert werden.

Fazit

Industrie 4.0 in der Gießereitechnik ist keine fertigungstechnische Revolution, sondern die konsequente Weiterentwicklung der bereits begonnenen durchgängigen digitalen Produktionsplanung. Industrie 4.0 in der Gießereitechnik birgt ein großes Potenzial mit der Notwendigkeit einer Top-Down-Strategie.

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, Dipl.-Ing. Benjamin Griebel und M.Sc. Florian Ettemeyer, Technische Universität München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg), Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier und Dipl.-Ing. Lionel Reiche, Universität Kassel, Fachbereich Maschinenbau – FB15, Lehrstuhl/Fachgebiet Gießereitechnik, Prof. Dr.-Ing. Dierk Hartmann, Hochschule für angewandte Wissenschaften Kempten, Labor für Werkstofftechnik und Betriebsfestigkeit, Prof. Dr.-Ing. Lothar H. Kallien, M. Eng. Martina Winkler, GTA – Gießerei Technologie Aalen, Hochschule Aalen Technik und Wirtschaft

ALUMINIUM CAST HOUSE TECHNOLOGY

