



Metalloptik ist bei Automobilen stark gefragt. Kunststoffbauteile werden dafür häufig lackiert oder galvanisiert. Eine Alternative stellen metallische Effektpigmente dar. Um Oberflächendefekte zu vermeiden, arbeiten Audi und PEG an einem Simulationsverfahren für diese Pigmente. © Audi

## Simulation von Oberflächendefekten bei Bauteilen mit Effektpigmenten

# Effektvolle Vorhersage

Mit Effektpigmenten können thermoplastische Bauteile mit einer metallisch glänzenden Oberfläche im Spritzgießverfahren hergestellt werden. Galvanisierung und Lackierung entfallen dabei, was ein großes Einsparpotenzial bietet. Eine inhomogene Pigmentorientierung während der Herstellung kann jedoch zu optische Fehlstellen auf der Bauteiloberfläche führen. Mithilfe einer passenden Simulationsmethodik lassen sich jedoch solche Oberflächendefekte vorhersagen und verhindern.

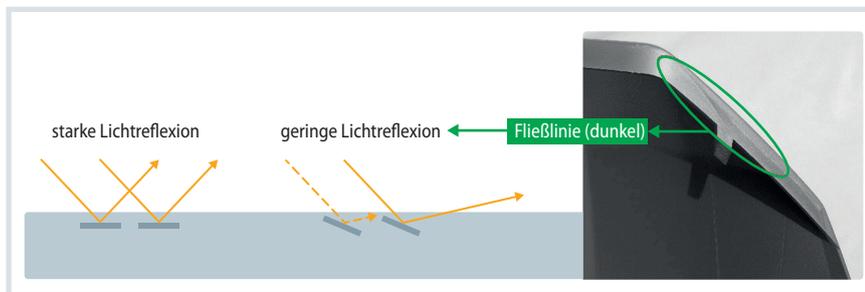
Zur Erzeugung einer metallischen Optik kommen bei Kunststoffbauteilen im Automobilbau unterschiedliche Oberflächenveredlungsverfahren wie Galvanik und Lackierung zum Einsatz. In der Regel sind diese Verfahren jedoch kostenintensiv und erschweren ein nachträgliches Recycling. Der Einsatz von metallischen Effektpigmenten für Automobilbauteile bietet daher sowohl aus Sicht der Wirtschaftlichkeit als auch der Nachhaltigkeit deutliche Vorteile. Bei der

sogenannten Mold-in-Color-Technologie (MIC) werden die Effektpigmente dem Granulat beigemischt. Im Spritzgießverfahren lassen sich damit anschließend Bauteile mit einer metallisch glänzenden Oberfläche herstellen. Bei Audi wird diese Technologie beispielsweise für Bauteile im Stoßfänger eingesetzt (**Bild 1**).

Die Herausforderung beim Einsatz dieser Technologie ist die Vermeidung von optischen Fehlstellen auf der Bauteiloberfläche. Die Ursache solcher Fehler

besteht in der Orientierung der metallischen Effektpigmente, welche sich bereits im Herstellungsprozess einstellt (**Bild 2**). Durch eine inhomogene Pigmentorientierung entstehen unterschiedliche Lichtreflexionen. Bereiche mit Fließlinien und Bindenähten werden in der Regel als dunkle Bereiche auf dem Bauteil sichtbar. Die Pigmentorientierung und daraus resultierende Fehlstellen können nur bedingt über Prozessparameter beeinflusst werden. Folglich ist es umso

**Bild 1.** Für die metallisch glänzenden Oberflächen von verschiedenen Bauteilen seiner Fahrzeuge verwendet Audi Effektpigmente. Sie kommen etwa beim Unterfahrschutz des A4 Allroad zum Einsatz. © Audi



**Bild 2.** Schematische Darstellung der Pigmentorientierung eines Bereichs ohne Fehlstelle (links) und eines Bereichs mit Fließlinie (rechts): Die Orientierung der Pigmente sorgt für eine unterschiedliche Lichtreflexion, wodurch der Eindruck eines Oberflächendefekts entsteht.

Quelle: Audi; Grafik: © Hanser

wichtiger, bereits in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung das Bauteildesign und das Werkzeugkonzept optimal zu gestalten.

### Kooperationsprojekt entwickelt neue Simulationsmethode

Ein Problem dabei ist jedoch, dass gegenwärtig keine simulative Methodik existiert, um die Pigmentorientierung und damit die Fehlstellen vorherzusagen zu können. In einem Kooperationsprojekt zwischen Audi, der Plastics Engineering Group (PEG) und der Technischen Universität Darmstadt wird gegenwärtig deshalb eine Methode entwickelt, um die Vorhersage solcher Fehlstellen zu ermöglichen. Dabei wird der Spritzgießprozess mit der Software Autodesk Moldflow Insight berechnet.

Liegen die Effektpigmente mit ihrer Oberfläche parallel zur Bauteiloberfläche, kann von einer ungestörten Lichtreflexion ausgegangen werden. Weisen sie hingegen einen, noch unbekanntem Winkel zur Oberfläche auf, ist von einer gestörten Lichtreflexion und damit einer optischen Fehlstelle auszugehen. Die programmtechnische Umsetzung sieht vor,

einen Differenzwinkel zwischen den Oberflächen der Effektpigmente (Flakennormale) und der Bauteiloberfläche (Elementnormale) zu berechnen und dadurch die möglichen optischen Fehlstellen über einen Differenzwinkel zu bewerten (**Bild 3**). Der prinzipielle Ablauf gliedert sich in drei Schritte:

- Erzeugung der zu untersuchenden CAD-Geometrie
- Aufbau und Durchführung der Spritzgießsimulation mit Orientierungsberechnung und angepasstem Aspektverhältnis
- Externe Fehlstellenberechnung und Rückimport in Moldflow zur grafischen Auswertung

Für den Ansatz sollen die in Autodesk Moldflow Insight enthaltenen Faserorientierungsmodelle verwendet und die dadurch berechneten Ergebnisse in einem nachgelagerten Postprocessing ausgewertet werden. Alle in Autodesk Moldflow enthaltenen Faserorientierungsmodelle haben freie Parameter, die zur Anpassung der Berechnungsergebnisse an beispielsweise experimentelle Ergebnisse verwendet werden können. Die zur Verfügung stehenden Faserorientierungsmodelle zeigen die wissenschaftliche

Weiterentwicklung in diesem Themengebiet auf:

- Bei dem **Folgar-Tucker-Modell** (FT) [1] und durch die Einführung von Tensoren zweiter Stufe zur Beschreibung von Orientierungsverteilungen [2] stehen dem Anwender in Moldflow zwei Modellparameter zur Verfügung. Dabei handelt es sich zum einen um das sogenannte Aspektverhältnis und zum anderen um den Interaktionskoeffizienten, der die Interaktion von Füllstoffpartikeln untereinander beschreibt.
- Das sogenannte **RSC-Modell** (reduced strain closure model) [3], das um einen weiteren Parameter ergänzt wurde, um der langsameren Orientierungskinetik im Randbereich Rechnung zu tragen, stellt in Summe drei Parameter zur Verfügung.
- Das aktuelle Standardmodell, das **Moldflow Rotational Diffusion Model** (MRD), bietet anstatt des Koeffizienten drei neue Koeffizienten. Für alle Modelle gilt, dass mit den Koeffizienten die sich über die Bauteilwanddicke einstellende Orientierungsverteilung beeinflusst werden kann. Das sogenannte Aspektverhältnis beschreibt hinge- ➤

## Info

### Text

**Dr. Daniel Kugele** arbeitet in der Technologieabsicherung bei Audi in Ingolstadt; [daniel.kugele@audi.de](mailto:daniel.kugele@audi.de)

**Dr. Sebastian Mönnich** arbeitet als Teamleiter Strukturmechanik bei der Plastics Engineering Group (PEG) in Darmstadt.

**Cigdem Belgeli, M.Sc.**, bearbeitete das Thema im Rahmen ihrer Masterarbeit an der TU Darmstadt.

### Kontakt

Plastics Engineering Group:

[www.pe-group.de](http://www.pe-group.de)

### Service

Weitere Informationen zu dem Thema finden Sie auch im VDI-Bericht „PIAE Europe 2021“.

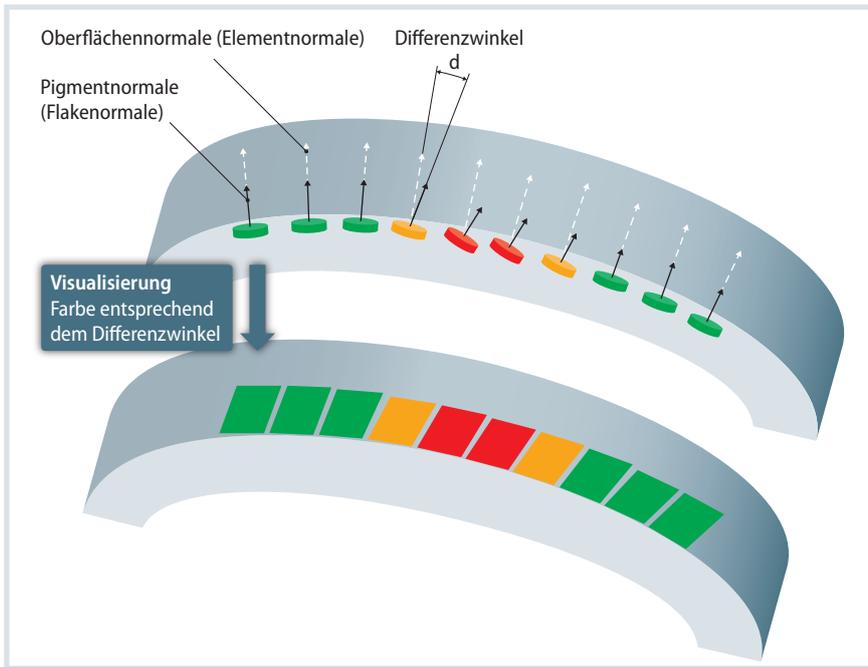
### Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter

[www.kunststoffe.de/onlinearchiv](http://www.kunststoffe.de/onlinearchiv)

### English Version

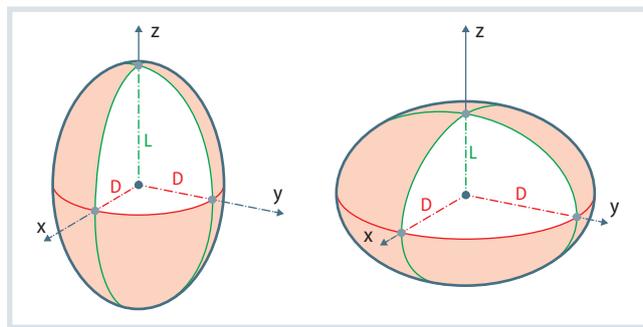
Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)



**Bild 3.** In der Simulation werden die Orientierungen der verschiedenen Pigmente vorhergesagt und der Differenzwinkel zwischen ihren Oberflächen und der Bauteiloberfläche berechnet. Anhand dessen lassen sich anschließend mögliche Fehlstellen prognostizieren. Quelle: Audi; Grafik: © Hanser

**Bild 4.** Je nach gewähltem Aspektverhältnis ändert sich die Gestalt des simulierten Pigments.

Quelle: [4]; Grafik: © Hanser



gen die Geometrie der im Polymer enthaltenen Partikel. Dabei beschreibt L die Länge eines Ellipsoids und D den Durchmesser (**Bild 4**). Der übliche Verwendungszweck der Orientierungsmodelle sieht ein Aspektverhältnis zwischen 10 und 40 vor. Dadurch nähert sich das Ellipsoid in seiner Gestalt einer Kurzglasfaser an. Wird das Aspektverhältnis deutlich kleiner als 1 gewählt, wird die ursprüngliche lange Halbachse sehr kurz gegenüber dem Durchmesser. Das Ellipsoid wird flacher und nähert sich in seiner Form einem Plättchen an. Auf Basis von Herstellerdaten der bei Audi eingesetzten Effektpigmente wurde ein Aspektverhältnis von durchschnittlich 0,001 berechnet und für alle durchgeführten Simulationen verwendet.

Ebenfalls durchgeführte Parameterstudien an einfachen Plattengeometrie zeigten, dass mit dem RSC-Modell die

besten Ergebnisse erzielt werden können. Bei dem Ergebnis der Moldflow-Simulation handelt es sich wie angesprochen um einen Orientierungstensor zweiter Stufe, der die Orientierungsverteilung der Flakes im Bauteil beschreibt. Aus diesem Orientierungstensor soll nun der Differenzwinkel zwischen Flakes und Oberflächennormale bestimmt werden. Der aktuelle Untersuchungsstand sieht nur eine Betrachtung der obersten Ele-

mentschicht des Modells der Spritzgießsimulation vor. Inwieweit tieferliegende Flakes zur Fehlstellenausbildung beitragen, ist unklar und wird gegenwärtig untersucht.

### Differenzwinkelberechnung: Was notwendig dafür ist

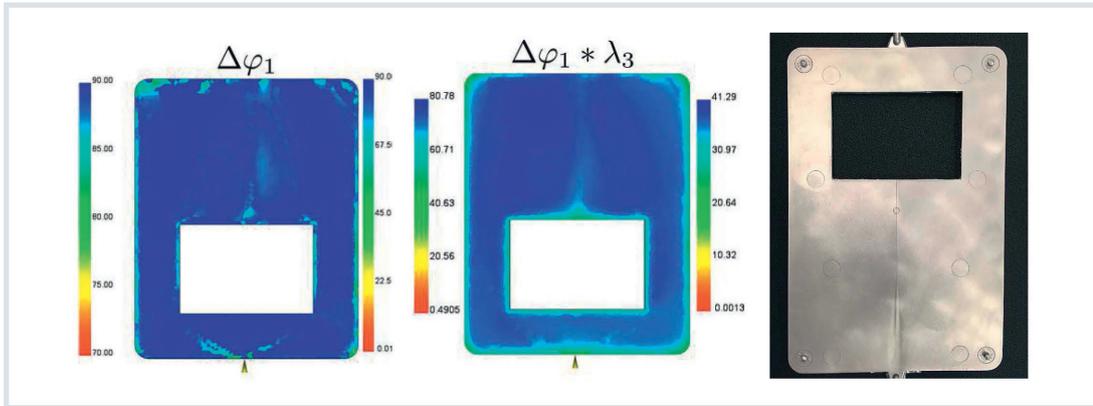
Um entsprechend der geplanten Methodik einen Differenzwinkel berechnen zu können, müssen zwei Vektoren zur Verfügung stehen. Zuerst werden die Elemente des Spritzgießnetzes identifiziert, die drei Knoten an der Bauteiloberfläche haben und deshalb als Oberflächenelemente gelten. Für die Seite der Elemente, die zwischen den drei identifizierten Knoten liegt, wird der Normalenvektor berechnet. Nach diesem ersten Schritt liegen nun alle Elementnummern der Oberflächenelemente und die zugehörigen Normalenvektoren vor.

Für die identifizierten Oberflächenelemente sind außerdem die aus den Moldflow-Simulationen berechneten Orientierungstensoren zweiter Stufe bekannt. Da der Orientierungstensor in Bezug auf das Bauteilkoordinatensystem vorliegt, kann er erst nach einer Transformation in das Hauptachsensystem verwendet werden (zu den Eigenschaften von Orientierungstensoren zweiter Stufe siehe [2]). Ableiten lässt sich, dass die Eigenwerte des Tensors den Grad der Orientierung und die zugehörigen Eigenvektoren die entsprechende Richtung beschreiben. Erste Ergebnisse, die nur den berechneten Differenzwinkel zwischen Oberflächennormale und Eigenvektor darstellen (**Bild 5**), zeigen sehr kleine Differenzen zwischen den beiden. Eine Multiplikation des Differenzwinkels mit dem zugehörigen Eigenwert verbessert die Darstellungsgüte deutlich.

Ziel der experimentellen Untersuchung ist die Validierung der Methodik anhand einer komplexen Bauteilgeome-

	PP	PMMA-Compound
Grundwandstärke	3 mm	3 mm
Werkzeugtemperatur	55 °C	80 °C
Massetemperatur	250 °C	260 °C
Einspritzzeiten $T_e$	0,8 s; 1 s; 2 s; 3 s	2 s; 3 s; 4 s
Nachdruck	400 bar (Profil)	400 bar (Profil)
Anzahl Bauteile	10 Bauteile je $T_e$	10 Bauteile je $T_e$

**Tabelle.** Versuchsparameter für die beiden verwendeten Materialien Quelle: Audi



**Bild 5.** Differenzwinkel (links) und Skalierung des Differenzwinkels über Eigenwert (rechts): Letzteres führt zu einer deutlich besseren Darstellungsgüte.

Quelle: [4]

trie und unter den Randbedingungen eines Serienprozesses. Dafür wurde ein Bauteil mit einer Abmessung von 400 mm x 375 mm ausgewählt, das unterschiedliche Konstruktionselemente wie Wanddickensprünge, Rippen, Schnapphaken, Durchbrüche und Schweißdome beinhaltet (Bild 6). Diese beeinflussen den Füllvorgang und stellen damit eine Herausforderung für die Verwendung von MIC-Material dar. Die Anspritzung erfolgt zentral auf der Ober-

seite des Bauteils, wobei neben dem Polypropylen (PP) Hifax TYC 459P (Hersteller: LyondellBasell) auch das Acrylic-PMMA-Compound Rotec AC-MA 50001 (Hersteller: Romira) zur Versuchsdurchführung eingesetzt wurde. In Vorversuchen hatte sich gezeigt, dass die Oberflächen-defekte signifikant von der Einspritzgeschwindigkeit abhängen. Höhere Einspritzgeschwindigkeiten verbessern die Bauteilqualität. Es entstehen weniger Fließlinien. Aus diesem Grund wurde bei

der Versuchsdurchführung die Einspritzzeit in mehreren Stufen variiert (Tabelle).

*Fehlstellen lassen sich zuverlässig vorhersagen*

Um die Vorhersagegüte der Methode zu bewerten, wurden die Ergebnisse der Simulation experimentellen Untersuchungen gegenübergestellt (Bild 7). Zur genaueren Bewertung der Fehlstellen wurden drei charakteristische Ab- »

www.powerfil.com

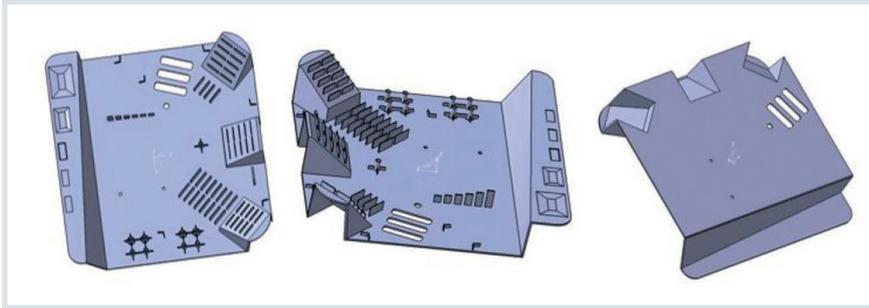
**STARKE STAND-ALONE FILTER VON EREMA**

Seit 35 Jahren ist EREMA Innovationsführer für hocheffiziente Kunststoffrecycling-Maschinen. Das Herzstück sind unsere Schmelzefilter. Robust, sicher und durchsatzstark – auch bei hohen Verschmutzungsgraden. Filter made by EREMA beweisen ihre Zuverlässigkeit seit Jahrzehnten unter härtesten Recyclingbedingungen. Mit unserer neuen Marke POWERFIL können Sie nun unsere Hochleistungsfilter für Ihre bestehende Extrusionsanlage nutzen. Plug in Experience. Plug in Performance.

EFFIZIENT    WIRTSCHAFTLICH    SICHER

K22 Another life for plastic. Because we care.

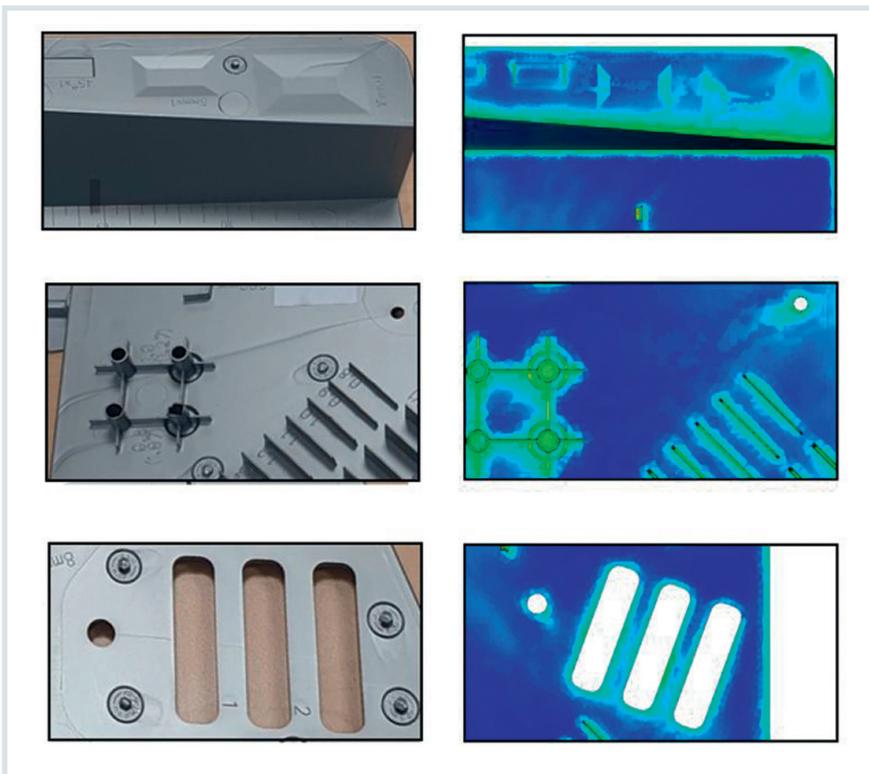
K22 MAIN BOOTH: Hall 9 / Booth C09  
OUTDOOR AREA: FG-CE03



**Bild 6.** CAD-Modell des Bauteils aus unterschiedlichen Perspektiven: Um die Methode bei verschiedenen Komponenten zu testen, beinhaltet das Bauteil Konstruktionselemente wie Rippen, Durchbrüche und Schweißdome. Quelle: [5]



**Bild 7.** Vergleich zwischen Experiment und Simulation für das gesamte Bauteil. Quelle: [4]



**Bild 8.** Vergleich zwischen Experiment und Simulation an drei Detailansichten: Fließlinien an Wanddickensprüngen (oben), Fließlinien nach Schweißdome (Mitte), Bindenaht nach Durchbrüchen (unten): Alle drei Beispiele verdeutlichen die gute Vorhersagegüte von Fehlstellen der Simulation. Für die Vorhersage der genauen Position und Form der Defekte muss die Methodik jedoch noch verbessert werden. Quelle: [4]

schnitte des Bauteils im Detail betrachtet. In einem Bauteilabschnitt wurde die Wanddicke an einigen Stellen reduziert (**Bild 8 oben**). In diesen Bereichen sind optische Fehlstellen in Form von dunklen Fließlinien gut erkennbar. Auch das Simulationsergebnis zeigt an diesen Stellen eine deutliche Farbvariation. Das Vorhandensein einer Fehlstelle und der Bereich des Fehlers lassen sich mit guter Prognosegüte vorhersagen. Die Länge und der exakte Verlauf der Fließlinie kann in der Simulation jedoch nicht bewertet werden.

### *Richtung der Fließlinie korrekt simuliert*

Die Fehlstellen lassen sich auch in den Bauteilbereichen mit Schweißdome und Durchbrüchen in der Simulation mit einer akzeptablen Unschärfe lokalisieren (**Bild 8 Mitte und unten**). Nach einem Durchbruch zeigt sich auf den Bauteilen (Experiment) stets eine feine, dunkle Bindenaht, deren Verlauf sich zumeist bis an den Bauteilrand (Fließwegende) zieht. In der Simulation ist nach einem Durchbruch eine deutliche Farbvariation erkennbar. Die Existenz einer Fehlstelle kann somit korrekt vorhergesagt werden. Auch die Richtung der Fließlinie lässt sich in der Regel feststellen. Das Ausmaß der Fehlstelle bezüglich Ausprägung, Dicke und Länge der Fließlinie kann allerdings nicht immer eindeutig ermittelt werden. Im Bereich der Schweißdome wird die Existenz von Fehlstellen durch die Betrachtung der Orientierungsverteilung richtig vorhergesagt. Allerdings lässt sich die genaue Position und der Verlauf der Fehlstellen auch in diesem Punkt nicht darstellen. In der Simulation werden tendenziell etwas mehr Fehlstellen vorhergesagt, als tatsächlich auf dem realen Bauteil zu finden sind.

Insgesamt zeigt die Methodik im Hinblick auf die Fehlervorhersage großes Potenzial, das weiter optimiert werden kann. Ein vielversprechender Ansatz könnte es sein, den Gradienten des Differenzwinkels zu berechnen und zu visualisieren. Grundlage für diese Überlegung ist die Tatsache, dass bei einer langsamen und kontinuierlichen Änderung des Differenzwinkels die Farbänderung nicht als Fehlstelle wahrgenommen wird. Eine abrupte Änderung ist hingegen deutlich wahrnehmbar und müsste sich insbesondere durch den Gradienten darstellen lassen. ■