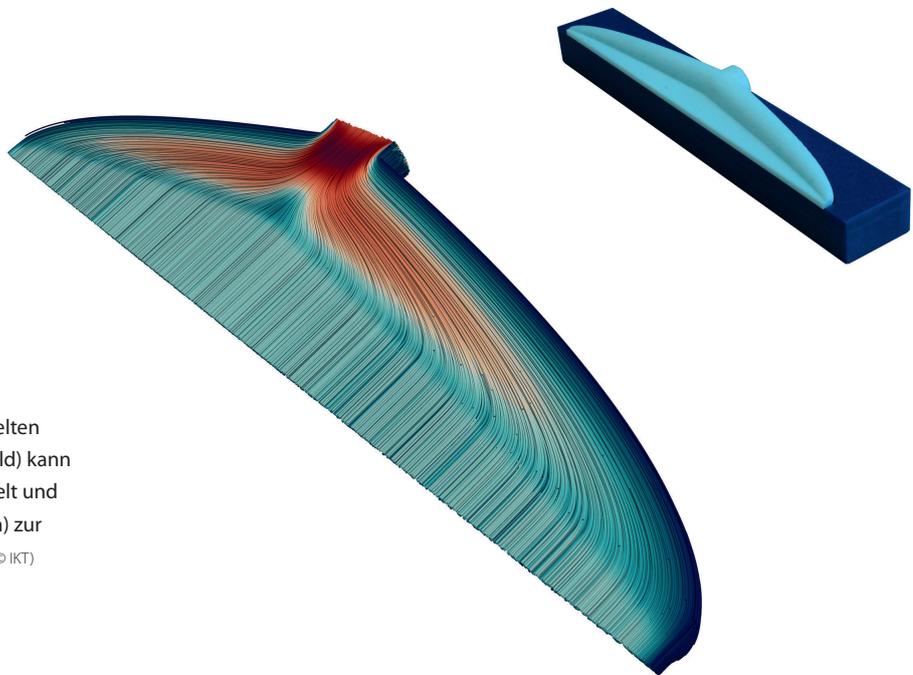


Breitschlitzdüsen schnell und effizient auslegen

Parametrisierbare Rechengitter beschleunigen die fluiddynamische Auslegung von Breitschlitzdüsen deutlich

Die Qualität extrudierter Folien und Platten ist stark von der Gestaltung der Breitschlitzdüse abhängig. Numerische Strömungssimulation ist inzwischen ein etabliertes Mittel, um die optimale Geometrie vorherzusagen. Am IKT in Stuttgart wird an einer Vorgehensweise geforscht, die eine viermal schnellere Simulation erlaubt.



Breitschlitzdüse: Mit dem neu entwickelten Simulationsmodell (links: Strömungsfeld) kann die optimale Geometrie schnell ermittelt und ein 3D-gedrucktes Modell (rechts oben) zur Veranschaulichung gefertigt werden © IKT

Zur Herstellung von Folien oder Platten kommen Extrusionswerkzeuge mit rechteckigem Querschnitt zum Einsatz [1]. Um höchste Produktqualitäten zu erreichen, wie beispielsweise bei der Fertigung von Brennstoffzellen, ist die virtuelle strömungstechnische Auslegung von Breitschlitzdüsen mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) von erheblicher Bedeutung. Wichtigste Optimierungskriterien sind eine gleichmäßige Geschwindigkeits- und Schergeschwindigkeitsverteilung der Schmelze am Werkzeugaustritt. Mit simulationsgestützter Auslegung

lassen sich dann Fehlkonstruktionen und Trial-and-Error-Schleifen vermeiden.

Der Simulationsprozess, beginnend mit einer Startgeometrie und endend mit dem optimierten Simulationsergebnis, nimmt heute noch zu viel Zeit in Anspruch, was insbesondere dann hohe Kosten für Unternehmen verursachen kann, wenn eine Designstudie vorzunehmen ist. Dies liegt auch nicht zuletzt daran, dass sehr viele Iterationen bis zur optimalen Geometrie benötigt werden und viele Software-Schnittstellen vorliegen. Je mehr Iterationen bis zum Ergebnis benö-

tigt werden, umso größer ist der Zeit- und Kostenaufwand.

Aus diesem Grund wurde am Institut für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart mithilfe moderner Simulationstechniken erstmalig ein neuartiges Simulationsmodell entwickelt, mit dem sich Breitschlitzdüsen um bis zu 87% schneller auslegen lassen als mit konventionellen Methoden. Die neue Methode greift zurück auf sogenannte parametrisierbare Rechengitter, die in der Simulation von Kunststoffverarbeitungsprozessen bisher kaum verbreitet sind.

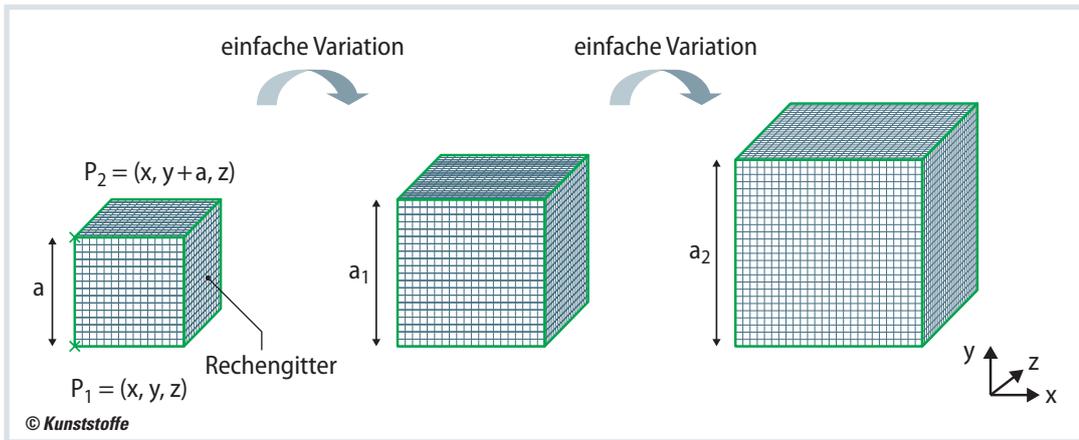


Bild 1. Prinzip der Parametrisierung, schematisch dargestellt an einem Würfel (Quelle: IKT)

Potenzial für Zeiteinsparung

Bei der herkömmlichen Auslegung von Extrusionswerkzeugen mittels CFD wird im sogenannten Preprocessing zuerst die Geometrie des Werkzeugs erstellt und anschließend virtuell in kleine Teile „zerschnitten“ („diskretisiert“). Im nächsten Schritt, dem sogenannten Solving, erfordert die Simulation das Lösen vieler Differenzialgleichungen. Zuletzt erfolgen im Postprocessing die Auswertung und Visualisierung der Simulationsergebnisse.

Im Laufe der Optimierung müssen alle diese Schritte für jede einzelne Geometrievariante des Werkzeugs wiederholt werden. Je mehr Iterationen bis zur optimalen Geometrie benötigt werden, umso größer ist der Zeit- und Kostenaufwand.

Während das Solving allein von der CPU-Leistung des Simulationsrechners abhängig ist und das Postprocessing nur einen recht geringen Aufwand darstellt,

bietet das Preprocessing den größten Stellhebel zur Reduzierung des Simulationsaufwands.

Der Kern des Simulationsmodells liegt in der neuartigen Methodik, Extrusionswerkzeuge strömungstechnisch ausulegen: Das Preprocessing wird effizienter, indem die Schritte der Geometrieerstellung und -aufbereitung mithilfe sogenannter Parametrisierung eliminiert werden.

Prinzip der Parametrisierung

Das Prinzip der Parametrisierung soll zunächst für ein recht einfaches Beispiel mithilfe von **Bild 1** erläutert werden. Ein Würfel ist mathematisch durch insgesamt acht Punkte und zwölf gleich lange Kanten definiert. Sollen nun drei Würfel mit jeweils einer unterschiedlichen Kantenlänge erzeugt werden, so kann jeder Punkt in Abhängigkeit von der Kan-

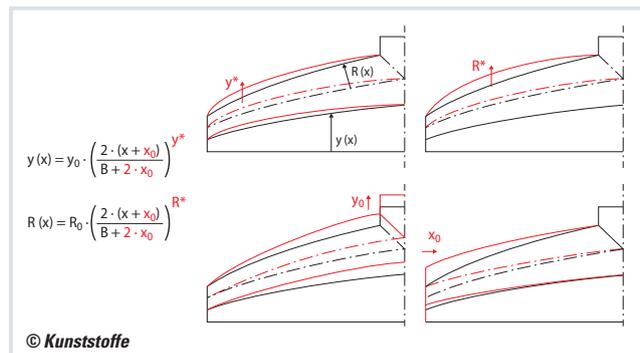


Bild 2. Einfluss der Parameter auf die Strömung im Verteiler: y_0 ist die maximale Inselfeldhöhe, y^* verstärkt/vermindert den Anstieg der Inselfeldfunktion, x_0 und R^* bewirken eine Stauchung bzw. Streckung (Quelle: IKT)

**ZELLPOLYETHYLEN | PE
DIREKT VOM HERSTELLER**

- ▶ sehr geringe Emissionen
- ▶ Automotive Qualitäten
- ▶ Selbstverlöschende Qualitäten
- ▶ Halogenfreie Qualitäten
- ▶ 8 verschiedene Farben
- ▶ EVA

Mehr Informationen unter:
Tel: +49 (0) 241 16 60 5-0 | E-Mail: sales@koep.de
Web: www.koep.de



KÖPP
experts in foam



KOEPCell®



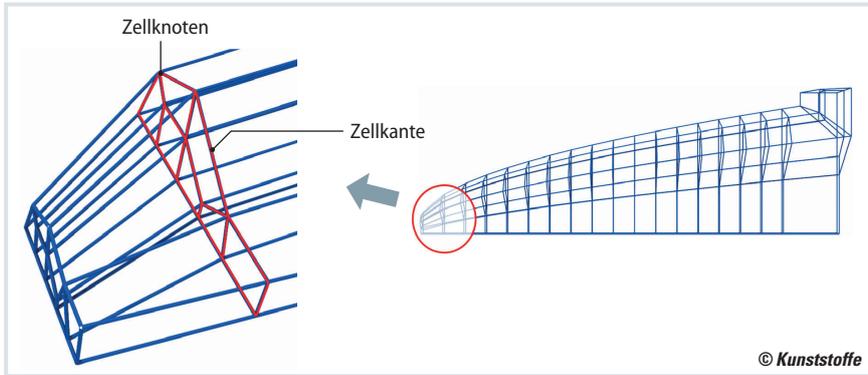


Bild 3. Der Kleiderbügelverteiler wird für die Rechengittererstellung in „Blöcke“ zerlegt (Quelle: IKT)

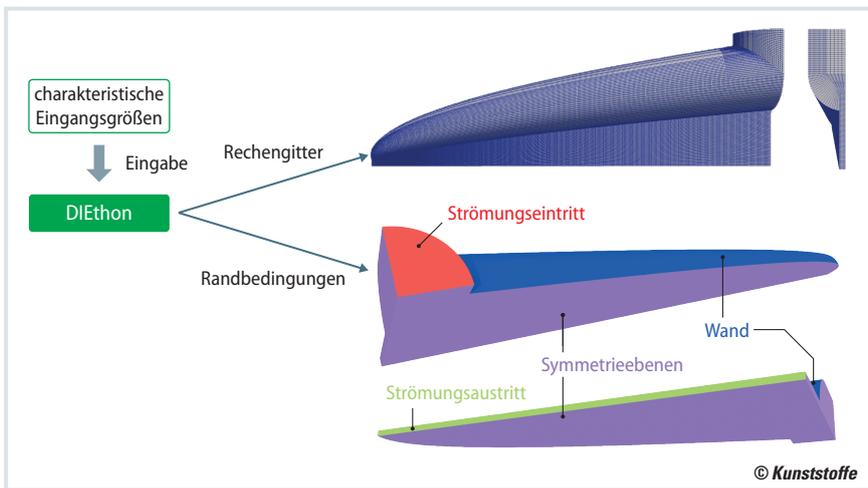


Bild 4. Effiziente Rechengittererstellung des Verteilersystems inkl. Randbedingungen (Quelle: IKT)

Schnell zum Rechengitter

Um ein Rechengitter zu erstellen, müssen die modifizierten Gleichungen in einen Programmcode implementiert werden, der alle notwendigen Informationen wie die Anzahl der Rechenzellen, Randbedingungen, Position der einzelnen Knotenpunkte und Verlauf der Zellkanten berechnet und ausgibt. Dazu wurde das Programmskript „DIEthon“ in Python [3] entwickelt, einer Programmiersprache mit sehr umfangreicher Funktionsbibliothek und schneller Codeausführung. Die Modellierung erfolgte mithilfe einer Blockstruktur des Kleiderbügelverteilers (**Bild 3**). Eingangsgrößen für die Erstellung des Rechengitters sind Spaltweite, Düsenbreite, Anfangsradius und die Anfangsinseldhöhe.

Den Aufbau des Rechengitters für den Kleiderbügelverteiler inklusive Randbedingungen, die für das Lösen des Strömungsfeldes benötigt werden und definiert werden müssen, übernimmt die frei erhältliche Simulationssoftware OpenFoam [4], die mit DIEthon kommuniziert (**Bild 4**). Die Rechenzeit beträgt nur wenige Sekunden, während die Erstellung des Rechengitters inkl. Geometriaufbereitung auf konventionelle Weise mehrere Stunden dauert. Um zusätzlich Rechenzeit zu sparen, werden die Symmetrieeigenschaften des Kleiderbügelverteilers genutzt und nur ein Viertel der Geometrie betrachtet. DIEthon bietet sogar die Möglichkeit, die Netzauflösung beliebig zu verfeinern, was für Netzstudien von großem Interesse ist, mit denen sich der Einfluss des Rechengitters auf die Simulationsergebnisse untersuchen lässt.

Kleiderbügelverteiler optimieren

Nachfolgend soll eine Optimierung des Kleiderbügelverteilers mit dem neuen Simulationsmodell demonstriert werden, deren Ziel eine gleichmäßige Austrittsgeschwindigkeit ist. Die charakteristischen Eingangsparameter für die Startgeometrie sind in **Bild 5** dargestellt. Das nicht-Newton'sche und nicht-isotherme Fließverhalten wird mit einem Carreau-Arrhenius-Ansatz [5] angenähert. Hierzu wurde eine Polyoxymethylen-Type (POM) im Labor des IKT rheologisch und thermodynamisch charakterisiert. Für die Durchführung der Simulationen wurde OpenFoam Version 5.x und für die Auswertung das Open-Source-Programm ParaView ver-

tenlänge mathematisch beschrieben werden. Dies ist in **Bild 1** für den Punkt P2 beispielhaft dargestellt. Alle weiteren Punkte können analog zu P2 ebenfalls mathematisch beschrieben werden, sodass die Position der weiteren Punkte automatisch berechnet wird. Also lassen sich durch nur eine einzelne Größe (Kantenlänge a) sehr einfach und innerhalb sehr kurzer Zeit drei unterschiedliche und bereits vernetzte Würfel generieren. Die Problematik der wiederholten Geometrie- und Rechengittererstellung kann somit auf einfache Weise gelöst werden.

Das Prinzip der parametrisierten Rechengitter wurde auf die komplexe Geometrie einer Breitschlitzdüse übertragen, in diesem Fall auf einen sogenannten Kleiderbügelverteiler. Die Basis für die Parametrisierung des Kleiderbügelverteilers bilden die eindimensionale Inselfeldfunktion $y(x)$ und Radiusfunktion $R(x)$ zur Beschreibung der Verteilerkontur [2]. Die Funktionen wurden um die Designparameter y_0 , x_0 , y^* und R^* erweitert, die vier Einstellmöglichkeiten für den Strömungswiderstand (**Bild 2**) bieten.

Die Autoren

Dipl.-Ing. Alptekin Celik ist seit 2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Verarbeitungstechnik des Instituts für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart; alptekin.celik@ikt.uni-stuttgart.de
Univ. Prof. Dr.-Ing. Christian Bonten leitet seit 2010 das IKT der Universität Stuttgart.

Dank

Die Autoren danken dem Studenten **B. Sc. Florian Roth** für seine Mitwirkung bei der Entwicklung des Programmcodes.

Service

Literatur & Digitalversion

➤ Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/2020-03

wendet, eine vielseitige Visualisierungsbibliothek für den Visualization Toolkit (VTK).

Vor der Durchführung der Optimierung wurde in Netzstudien ein Kompromiss zwischen akzeptabler Rechenzeit (bis zu einer Stunde) und ausreichender Genauigkeit der Ergebnisse mit ca. 370 000 Rechenzellen gefunden. Eine ausreichende Genauigkeit der Ergebnisse ist dann gegeben, wenn für verschiedene Rechengitter die Verläufe der Strömungsgrößen in unterschiedlichen, definierten Bereichen übereinanderliegen (Netzkonvergenz). Zur Optimierung hinsichtlich einer gleichmäßigen Austrittsgeschwindigkeit wurde die Anfangsinseldhöhe y_0 variiert.

Bild 6 zeigt die berechneten Geschwindigkeitsprofile entlang des Austritts. Für die Startgeometrie ($y_0 = 20$ mm) ist ein ungleichmäßiges Profil zu erkennen, da der Betrag der Geschwindigkeit hier um ca. 2 mm/s schwankt. Am Düsenende (0 mm) würde in der Realität somit deutlich weniger, in der Düsenmitte (168,75 mm) hingegen deutlich mehr Kunststoffschmelze austreten, was wiederum zu einer ungleichmäßigen Abkühlung und somit schlechteren Bauteilqualität führen würde. Am Düsenende muss also der Strömungswiderstand verringert und an der Düsenmitte erhöht werden. Wird y_0 auf 25 mm erhöht, ergibt sich ein deutlich gleichmäßigeres Profil. Eine Erhöhung auf $y_0 = 26$ mm und $y_0 = 27$ mm führt dazu, dass am Düsenende eine höhere und in der Düsenmitte eine niedrigere Geschwindigkeit vorliegt. Das Optimum ist hierbei definiert als der Betrag der Austrittsgeschwindigkeit, die über den Düsenaustritt nicht mehr als 0,1 mm/s schwankt. Es wird schließlich $y_0 = 25,5$ mm nach vier Iterationen erreicht.

Das Geschwindigkeitsfeld der optimierten Geometrie ist in **Bild 7** dargestellt. Am Eintritt in das Verteilersystem ist die Geschwindigkeit hoch und nimmt dann durch die Aufweitung der Düse mit dem Eintritt der Schmelze in den Verteilerkanal ab. Am Austritt ist der Betrag der Geschwindigkeit gleichmäßig.

Falls die Anfangsinseldhöhe beispielsweise aus konstruktiven Gründen nicht verändert werden darf, ist mit der entwickelten Software alternativ immer noch eine Optimierung mittels der definierten Designparameter (**Bild 2**) möglich. Um das Ergebnis einfach in ein CAD-Modell überführen zu können, werden die gewählten Eingangparameter automatisch bei jeder Simulation in eine Datei

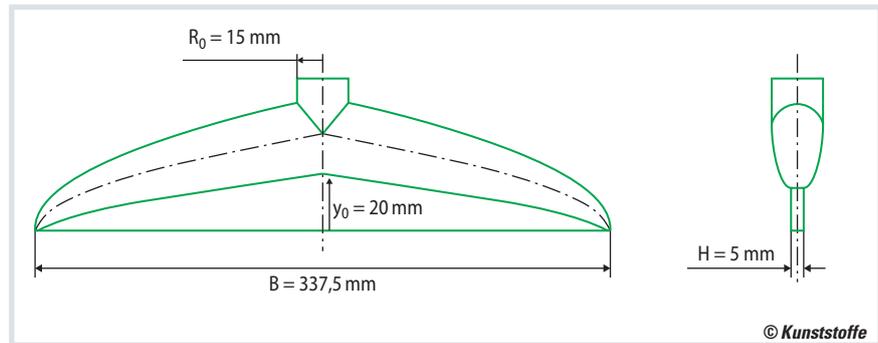


Bild 5. Eingangparameter der Startgeometrie für die fluiddynamische Optimierung (Quelle: IKT)

geschrieben. Eine CAD-Software kann diese Datei einlesen und daraus direkt das CAD-Modell erzeugen, z.B. im STEP-Format (Standard for the Exchange of Product Model Data).

Zeitbedarf im Vergleich

Weiterhin wurde untersucht, ob mit der neuen Methode tatsächlich eine Zeiteinsparung im Auslegungsprozess im Vergleich zur herkömmlichen Auslegung einhergeht. Dazu wurde die ursprüngliche Geometrie des Kleiderbügelverteilers auf

herkömmliche Weise und mit der neuen Methode vernetzt. Die dafür auf einem PC-System (Hersteller: Intel, Typ: Xeon E3-1240v3, 3,4 GHz, 16 GB DDR3-1600) benötigten Zeiten zeigt **Bild 8**. Die Ladezeiten für OpenFoam, also die Zeit, welche für das Laden des Programms selbst benötigt wird, mit der neuen und der herkömmlichen Methode unterscheiden sich voneinander: DIETHON erstellt das Rechengitter direkt, während bei der herkömmlichen Methode das Rechengitter noch importiert werden muss, da es mit der bisherigen Methode üblicherweise mit ei- ➤



SWISS PRIME MEASURING SINCE 1957

Die Wandstärke stets im Griff

RAYEX S XT

- Präzise Vermessung von Wandstärke, Exzentrizität und Durchmesser
- Einfache und schnelle Einrichtung für neue Produkte
- Hochwertige Röntgenquellen mit höchster Lebensdauer






30.03 - 03.04.2020
Düsseldorf, DE
Halle 11 / Stand D41

www.zumbach.com • sales@zumbach.ch

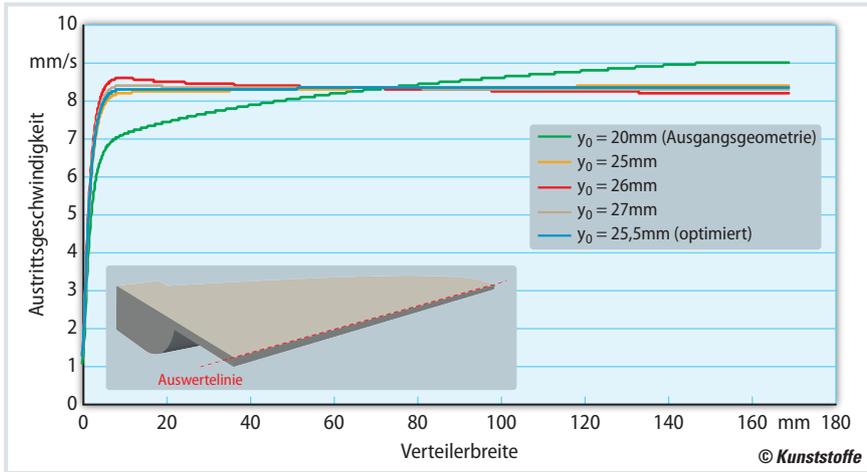


Bild 6. Geschwindigkeitsprofile am Verteileraustritt je nach Anfangsinseldhöhe y_0 (Quelle: IKT)

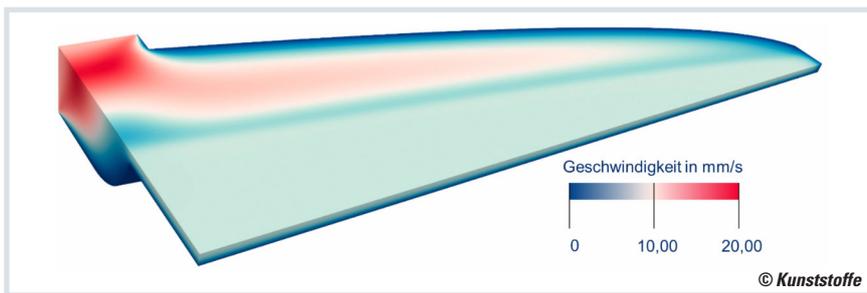


Bild 7. Geschwindigkeitsfeld der optimierten Verteilergeometrie (Quelle: IKT)

ner externen Software erst erstellt wird. Die benötigten Zeiten wurden mehrmals immer für denselben Anwender aufgenommen, um den subjektiven Einfluss der manuellen Dateneingabe zu reduzieren. So steht nicht der absolut erreichte Wert, sondern vor allem die Zeitdifferenz der herkömmlichen und neu entwickelten Methode im Vordergrund.

Der Zeitaufwand konnte von 4:37 min um 87 % auf 35 s gesenkt werden. Sollen z.B. zehn Geometrievarianten vernetzt werden, was in der Praxis durchaus üblich sein kann, so benötigt die neue Methode

nicht einmal 6 min, während bisher ca. 45 min erforderlich waren. Diese Zeiteinsparung ist nicht zuletzt der schnellen Code-Ausführung per Programmskript durch DIEthon und OpenFoam zu verdanken und ergibt sich, obwohl in der herkömmlichen Methode sogar ein parametrisiertes CAD-Modell eingesetzt wurde, in dem die charakteristischen Eingangsgrößen eingegeben wurden. Hier werden die Vorteile von DIEthon klar erkennbar: Eine Nutzerinteraktion muss nur einmal im Terminal stattfinden, und es gibt keine weiteren Software-Schnittstel-

len, wie beispielsweise eine weitere Software für das Erstellen des Rechengitters.

Fazit und Ausblick

Mit dem neu entwickelten Simulationstool lassen sich Kleiderbügelverteiler weit schneller als bisher auslegen. Es wurden Simulationen unter Berücksichtigung des strukturviskosen und temperaturabhängigen Fließverhaltens eines POM durchgeführt, die zeigen, dass eine Optimierung des Kleiderbügelverteilers mit DIEthon durchaus bislang ungehobene Potenziale hebt. Die Anzahl an Software-Schnittstellen wurde signifikant reduziert und der Schritt der iterativen Geometrieerstellung gänzlich eliminiert. Somit konnte insgesamt die für die Rechengittergenerierung benötigte Zeit im direkten Vergleich zur herkömmlichen Methode erheblich verkürzt werden. Die Zeitersparnis macht sich insbesondere bei einer Optimierung mit mehreren Iterationen und Geometrievarianten bemerkbar.

Das IKT forscht derzeit weiter an der Entwicklung eines Optimierungsalgorithmus im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekts innerhalb des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) [6]. Er soll so gestaltet werden, dass die charakteristischen Eingangsparameter eigenständig mit Methoden der künstlichen Intelligenz optimiert werden. Eine Nutzerinteraktion soll nur zum Starten erfolgen. Außerdem wird im Projekt das Ziel verfolgt, das Extrusionswerkzeug additiv zu fertigen, um die Vorteile der freien Gestaltung für eine konturnahe Temperierung zu nutzen. Das Projekt wird mit den Projektpartnern Gehr-Kunststoffwerk GmbH & Co. KG und mawe presstec GmbH verwirklicht. ■

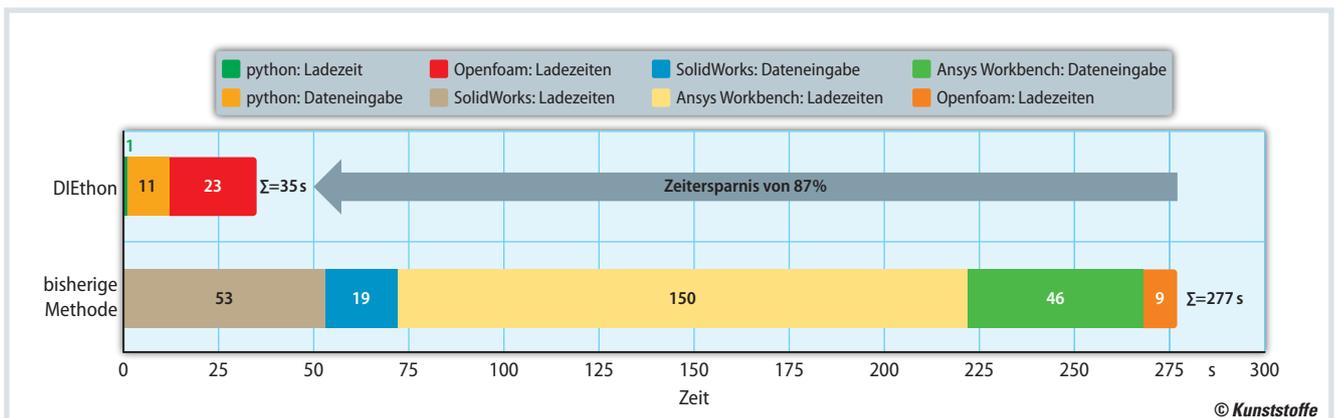


Bild 8. Rechengittererstellung: Mit dem neuen Simulationsmodell wird der Zeitaufwand deutlich reduziert (Quelle: IKT)