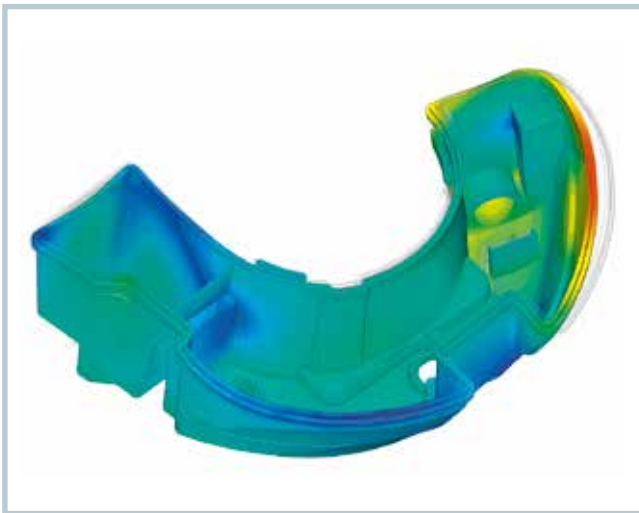


# Verzugsoptimale Bauteilauslegung

## Optimierte Wanddickenverteilung minimiert Formteilverzug beim Spritzgießen

Der Formteilverzug ist ein allgegenwärtiges Problem bei der Entwicklung von Spritzgussteilen. Ein neuartiges Konzept zur automatischen Wanddickenoptimierung hilft, die zeit- und kostenaufwendigen Iterationsschleifen möglichst gering zu halten.



Der Formteilverzug ist ein allgegenwärtiges Problem bei der Entwicklung von Spritzgussteilen (Bilder: IWK)

Der Formteilverzug, d. h. die Abweichung zwischen der Soll- und Ist-Gestalt eines Formteils, zählt zu den zehn größten Problemen bei der Spritzgießverarbeitung [1]. Dies, obschon die Forschung der vergangenen 60 Jahre mehr als ein halbes Dutzend unterschiedliche Simulationsprogramme hervorgebracht hat, die die Erhaltungsgleichungen für Maße, Impuls und Energie durch Anwendung der Finite-Elemente- oder Finite-Differenzen-Methode lösen können.

Neben dem Formfüllverhalten berechnen diese auch die prozessbedingten Deformationsvektoren und damit den Formteilverzug. Während die Genauigkeit der Verzugsvorhersage insbesondere bei Kunststoffen mit komplexer Morphologie, wie z. B. bei faserverstärkten oder teilkristallinen Thermoplasten, durch Betrachtung der Mikroskala weiter gesteigert wird [2, 3], fehlt es im Falle von inakzeptablen Verzugswerten an Mitteln, diese möglichst schnell und automatisiert in ein akzeptables Maß zu lenken.

### Möglichkeiten zur Verzugsminimierung

Ausgehend von der Wahl eines verzugsarmen Kunststoffs lässt sich der Formteilverzug grundsätzlich

- durch die Variation der Prozessparameter innerhalb des zulässigen Prozessfensters,
- durch Variation der Angusslage und
- durch Optimierung der Wanddickenverteilung beeinflussen [4]. Während die Optimierung der Prozessparameter in unzähligen Forschungsarbeiten umfassend untersucht ist und zudem oft als nachteilige Eigenschaft die Einschränkung des Prozessfensters nach sich zieht, lässt die Variation der Angussposition infolge starker Restriktionen durch bewegliche Werkzeugelemente meist nicht viel Spielraum für die Optimierung.

Aus diesem Grund zielt die vorliegende Arbeit darauf, den Formteilverzug durch eine bessere Wanddickenverteilung zu verringern. Erste Forschungsarbeiten dazu gehen in die 1990er-Jahre zurück; sie zeigen, dass durch diskrete Variation der Wanddicken der Formteilverzug stark beeinflusst werden kann [5, 6]. Grund dafür ist der große Einfluss, den die Wanddicke generell auf den Prozess der Formteilentstehung ausübt, was sich durch Einbeziehung der Erhaltungsgleichungen sowie der Kontinuumsmechanik theoretisch belegen lässt.

### Der Lösungsansatz

Darauf aufbauend, entwickelte das Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK) der Hochschule Rapperswil/Schweiz eine automatische Optimierungsroutine (**Bild 1**). Diese setzt sich aus drei unterschiedlichen Bausteinen zusammen:

- dem Optimierungsalgorithmus,
- dem Geometriemanipulationstool und
- der Spritzgießsimulation.

Ausgehend von der Initialgeometrie wird die Wanddickenverteilung im Formteil (kontinuierlich) in benutzerdefinierten Abschnitten so optimiert, dass der Verzug immer weiter abnimmt. Gesteuert wird diese iterativ ablaufende Routine vom Optimierungsalgorithmus, der bis zum Erreichen eines Abbruchkriteriums laufend neue Designvariablen generiert, die vom Geometriemanipulationstool in neue Geometrien umgewandelt und durch Anwendung der Spritzgießsimulation bewertet werden.

Für die Umsetzung dieses Lösungsansatzes gilt es, die einzelnen Bausteine zu definieren bzw. nach Notwendigkeit neu zu entwickeln und für den automatischen Datenaustausch miteinander zu verknüpfen. Die Praktikabilität, definiert durch minimalen Benutzerinput, schnelle Lösungsfindung und Umsetzung,

steht dabei im Vordergrund. Demgegenüber stehen einige Herausforderungen, wie der fehlende oder nur lokal durch entsprechend hohen numerischen Aufwand generierbare funktionale Zusammenhang, der im Allgemeinen hohe Rechenbedarf bei der Spritzgießsimulation und die Schwierigkeit zur großflächigen und kontinuierlichen Wanddickenvariation mit möglichst wenigen Designvariablen.

### Optimierungsalgorithmus und Spritzgießsimulation

Das erste Problem lässt sich durch den Einsatz ableitungsfreier Optimierungsalgorithmen lösen. Klassifiziert nach der Strategie der Lösungssuche, unterscheidet man zwischen direkten Suchmethoden und Approximationsverfahren. In Voruntersuchungen erwies sich bei komplexen Geometrien und einer hohen Anzahl an Designvariablen (>9) die direkte Suchmethode auf Basis eines Genetischen Algorithmus (GA) als Methode mit der besten Lösungsgüte.

Der GA basiert auf evolutionären Operationen, bestehend aus Selektion, Kreuzung und Mutation. Dazu wird eine Population mit einer konkreten Anzahl an Individuen bestimmt, wobei jedes Individuum einem Design, d. h. einer Geometrie mit einer definierten Wanddickenverteilung, entspricht. Die Individuen durchlaufen iterativ die genetischen Operationen, bis am Ende diejenigen mit dem höchsten Anpassungsgrad übrig bleiben, was einer optimalen Wanddickenverteilung gleichkommt. Im Vergleich zu »

## Vorteile auf einen Blick

Die hier vorgestellte Optimierungsroutine zeichnet sich aus durch:

- die verzugsoptimale Formteilauslegung durch automatische Wanddickenanpassung,
- den geringen Anwenderinput,
- die Möglichkeit zur Optimierung des Materialaufwands,
- ihre besondere Eignung für Formteile mit niedrigem Aspektverhältnis.

## Die Autoren

**Prof. Dr.-Ing. Frank Ehrig** ist Leiter des Instituts für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK) der Hochschule Rapperswil/Schweiz; fehrig@hsr.ch

**MSc ME ETH Mario Studer** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am IWK; mstuder@hsr.ch

### Dank

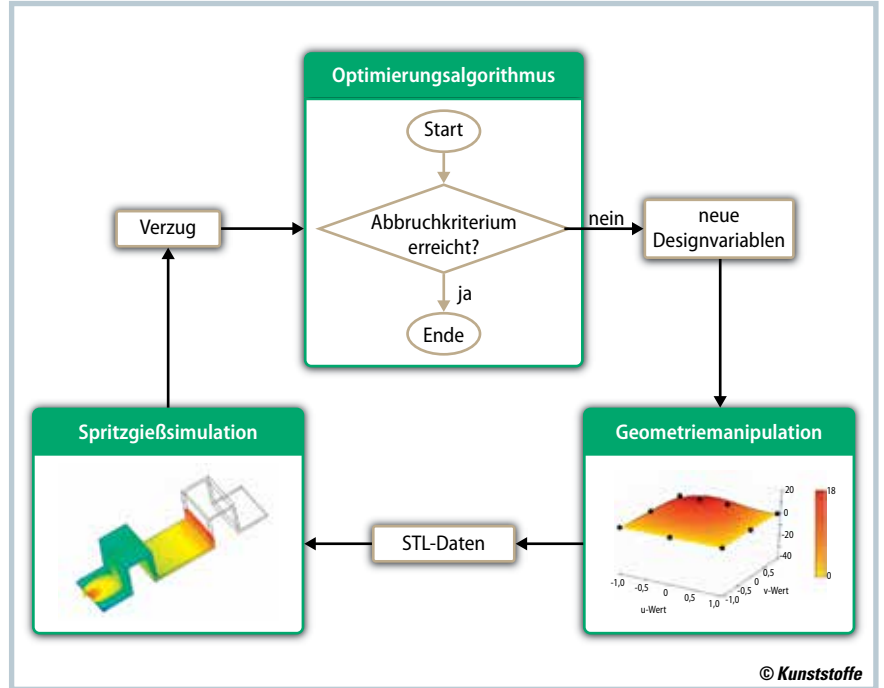
Der Dank der Autoren gilt der Simcon kunststofftechnische Software GmbH für die kostenlose Nutzung der Software Cadmould 3D-F CMV6 wie auch den Mitwirkenden weiterer für die Arbeit hilfreicher Opensource-Projekte wie Python und Pyevolve.

## Service

### Literatur & Digitalversion

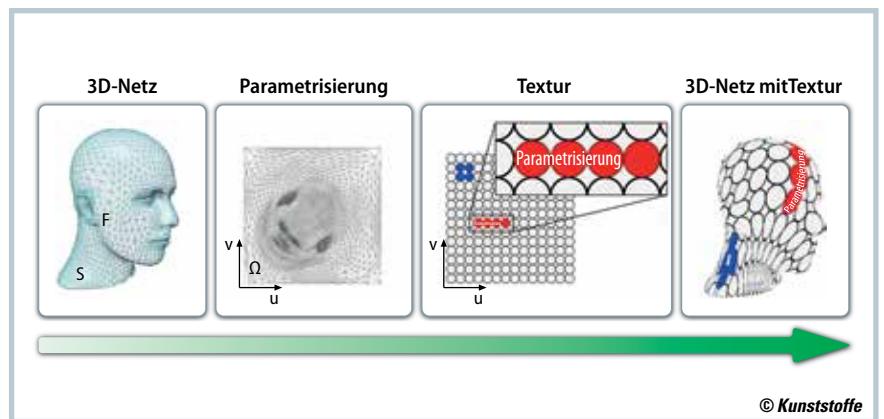
- » Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/977932](http://www.kunststoffe.de/977932)

**Bild 1.** Der Lösungsansatz zur automatischen Reduktion des Formteilverzugs basiert auf der Optimierung der Wanddickenverteilung



© Kunststoffe

**Bild 2.** Die hier visualisierte Parametrisierung des Oberflächennetzes dient bei der Computeranimation zur Übertragung von Texturen [7]



© Kunststoffe

anderen Methoden nimmt man dabei eine deutlich höhere Anzahl an Funktionsaufrufen (Simulationdurchläufen) in Kauf. Aufgrund der Möglichkeit zur Parallelisierung liegt die Rechendauer bei der Verwendung von Rechnern mit Mehr-Kern-Prozessoren jedoch in vergleichbarer Größenordnung.

Für die zweite Anforderung hält der Markt mit dem Programm Cadmould 3D-F CMV6 (Anbieter: Simcon kunststofftechnische Software GmbH, Würselen) bereits eine Lösung bereit. Basierend auf der vom Hersteller patentierten 3D-Fachwerkstechnologie werden darin Erhaltungsgleichungen auf effiziente Art gelöst, was eine hohe Rechengeschwindigkeit zur Folge hat. Als Ergebnis resultiert die deformationsbehaftete Formteilgeometrie. Durch den Vergleich mit der Initialgeometrie (Formteilkavität) lässt sich damit ein Maß für den Formteilverzug bestimmen.

Anstelle der verbreiteten Verzugsdefinition, die das deformierte Formteil mit der um einen isotropen Schwindungsanteil skalierten Kavität vergleicht, wurde für die Optimierung ein neues Verzugsmaß definiert. Dabei werden die durch den Spritzgießprozess anfallenden Winkeländerungen  $\varphi_{w,i}$  der Flächennormalen einer beliebig definierbaren Elementauswahl  $S_w$  berechnet. Als Maß für den Formteilverzug  $F_w$  werden davon der Mittelwert

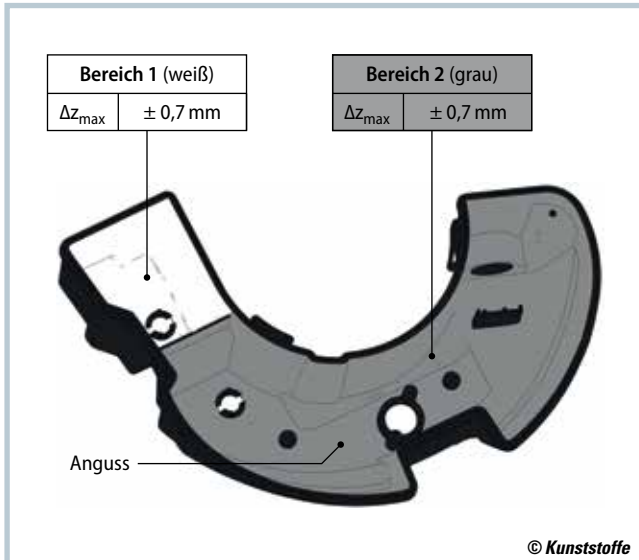
$\varphi_{w,av}$  und der Maximalwert  $\varphi_{w,max}$  gebildet und aufsummiert. Um gleiche Größenordnungen zu erzielen, werden die Werte der aktuellen Geometrie jeweils auf die Werte der Initialgeometrie (Index 0) bezogen:

$$F_w = \frac{\varphi_{w,av}}{\varphi_{w,av}^0} + \frac{\varphi_{w,max}}{\varphi_{w,max}^0}$$

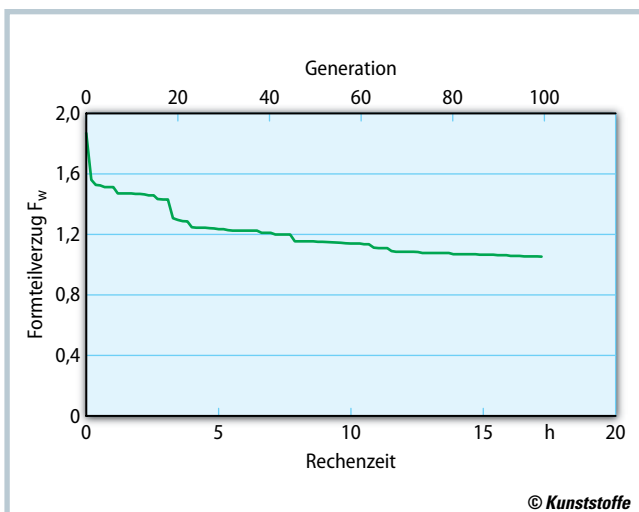
### Geometriemanipulation durch Parametrisierung des Oberflächennetzes

Das Geometriemanipulationstool stellt den eigentlichen Kernpunkt der Optimierungsroutine dar. Es basiert auf einer Parametrisierung des Oberflächennetzes, die im Bereich der Computeranimation für die Projektion von 2D-Bildern oder Texturen auf 3D-Objekte eingesetzt wird (**Bild 2**). Dazu wird eine triangulierte Oberfläche  $S$  in die Ebene  $\Omega$  transformiert; daran werden Bildpunkte angewendet und durch die Parametrisierung auf das Original übertragen (v.l.n.r.).

Die Idee besteht nun darin, anstelle von Bildpunkten mit Polynomfunktionen modellierte Oberflächenänderungen zu übertragen. Daraus resultiert eine funktionalisierte Geometrie, deren



**Bild 3.** In der hier dargestellten Initialgeometrie sind die beiden Bereiche gekennzeichnet, in denen die Variation der Wanddickenverteilung stattfindet



**Bild 4.** Aus der Optimierungshistorie geht die zeitliche Entwicklung des Formteilverzugs hervor. Die optimale Wanddickenverteilung wird nach etwas mehr als 17 Stunden erreicht

Oberfläche sich durch wenige Stützpunkte  $x$  kontinuierlich variieren lässt. Die Optimierung verfolgt nun das Ziel, den Formteilverzug  $F_w$  durch Variation der Stützpunkte  $x$  zu minimieren:

$$\min_x \{F_w(x)\}$$

Um möglichst reale Prozessbedingungen während der Optimierung gewährleisten zu können, werden die Nachdruck- und Restkühlzeit laufend an die neuen Wanddickenverhältnisse angepasst. Die übrigen Prozessparameter bleiben konstant.

### Erste Anwendung an einem gehäuseartigen Formteil

Die Praktikabilität und Ergebnisqualität der hier vorgestellten Optimierungsroutine wird an einem gehäuseartigen Formteil aus der Industrie mit den Abmessungen 260x225x125 mm »

Prozesseinstellung	Wert
Einspritzvolumenstrom	128,3 cm <sup>3</sup> /s
Nachdruckzeit	15 s
Restkühlzeit	10 s
Nachdruck	600 bar
Schmelztemperatur	240 °C
Werkzeugwandtemperatur	27 °C

**Tabelle 1.** Die initialen Prozessparameter für die Optimierung der Wanddickenverteilung

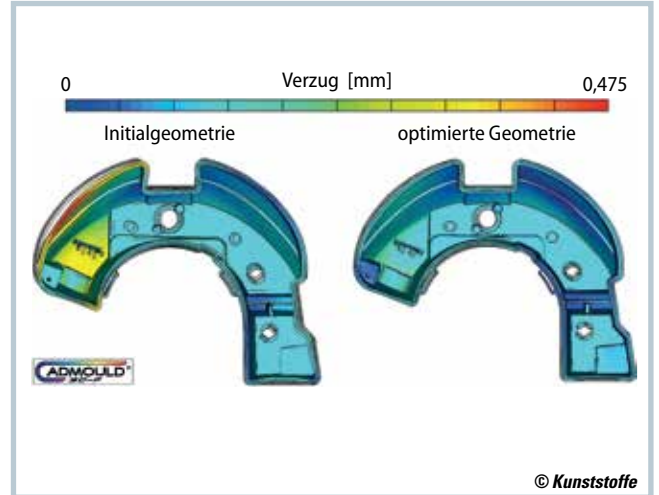
überprüft (**Bild 3**). Als Formmasse wird ein ABS verwendet. Für die Variation der Wanddickenverteilung wurden zwei innenliegende Bereiche definiert und in jedem die Wanddicke innerhalb der Grenzen von  $\pm 0,7$  mm mit einem Polynomgrad von 2 variiert. Die Prozessparameter für die Initialgeometrie sind in **Tabelle 1** ersichtlich.

Da das vorliegende Bauteil nach der späteren Montage mit einem Deckel verschlossen wird, bestehen die größten Qualitätsansprüche im oberen Randbereich. Dieser Bereich stellt somit zugleich die Elementauswahl für die Verzugsoptimierung dar. Der Vorgang beginnt mit einem Preprocessing, bei dem die Parametrisierung der beiden Auswahlbereiche vorgenommen wird. Die daraus resultierenden Daten werden in den Zwischenspeicher abgelegt, wovon sie während der Optimierung jeweils abgerufen werden.

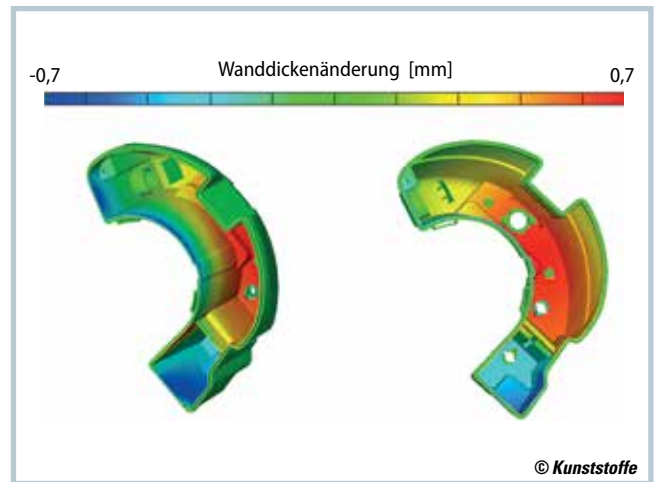
Von den Einstellparametern des GA wurden bis auf die Populationsgröße alle übrigen Parameter nach den Empfehlungen aus der Literatur und basierend auf Voruntersuchungen gehandhabt. Die Populationsgröße wurde mit acht Individuen absichtlich klein gehalten und die Optimierungsrechnung auf einem Standardrechner (Intel i7 Prozessor, 16 GB RAM) vorgenommen.

Aus der Historie der Optimierung (**Bild 4**) ist ersichtlich, dass dieser Vorgang mit Erreichen der 100. Generation nach rund 18 Stunden beendet wurde. Innerhalb dieser Zeit verringert der Algorithmus den Wert für die Zielfunktion von anfänglich 2,0 auf 1,05. Leichter zu interpretieren ist der Formteilverzug – hier zeigt sich, dass insbesondere der starke Einfall der Seitenwand reduziert werden konnte (**Bild 5**). Zudem verringert sich bei der optimierten Geometrie die Gefahr der Entstehung von Einfallstellen.

Ein interessantes Ergebnis drückt sich im Vergleich der Wanddickenverteilung zwischen der optimierten und der initialen Geometrie aus (**Bild 6**). Demgemäß bewirkt der Algorithmus im Bereich des Angusses eine Zunahme der Wanddicke, während in angussfernen Bereichen die Wanddicke tendenziell reduziert wird. Dieses Ergebnis lässt sich dahingehend interpretieren, dass die Zunahme der Wanddicke im angussnahen Bereich die Druckübertragung und damit die Kompensation der Schwindung verbessert, während die Reduktion der Wanddicke in angussfernen Bereichen dort das Schwindungspotenzial reduziert und den am Fließwegende zunehmenden Fließquerschnitt (niedrigere Randschichtdicke) ausgleicht. Dies führt zu einem homogeneren Schwindungsverhalten und letztlich zu einer Reduktion des Verzugs potenzials.



**Bild 5.** Der Vergleich der Verzugswerte zwischen der Initialgeometrie (links) und der Geometrie mit optimierter Wanddickenverteilung (rechts) verdeutlicht die Wirksamkeit der Optimierungsroutine



**Bild 6.** Darstellung der Wanddickenänderungen mittels Farbplot: Der Vergleich zwischen der optimierten und der Initialgeometrie zeigt, dass im angussnahen Bereich die Wanddicke zunimmt (rote Farbe), während sie an den Randzonen und im angussfernen Bereich abnimmt (blaue Farbe)

### Fazit

Die Optimierung der Wanddickenverteilung stellt ein probates Mittel zur Reduktion des Formteilverzugs dar. Mit der hier vorgestellten Routine kann die Wanddickenverteilung mit geringem Anwenderinput und ohne den Einsatz eines kommerziellen CAD-Tools gezielt und innerhalb eines Tages auf handelsüblichen Rechnern optimiert werden. Als Ergebnis liegt eine STL-Datei für die Formteilkavität mit optimierter Wanddickenverteilung vor, die der Konstrukteur ins originale 3D-CAD-Modell integrieren kann.

Das Einbeziehen weiterer Optimierungskriterien, wie z.B. das Formteilverzugsmaß, eröffnet der beschriebenen Optimierungsroutine zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten. Davon stellt insbesondere die Minimierung des Materialaufwands ein wichtiges Thema dar. Hierzu liegen bereits erste vielversprechende Ergebnisse an praxisnahen Formteilen vor [8]. ■