

Zeitschrift Kunststofftechnik

Journal of Plastics Technology

archivierte, peer-rezensierte Internetzeitschrift des Wissenschaftlichen Arbeitskreises Kunststofftechnik (WAK)
archival, peer-reviewed online Journal of the Scientific Alliance of Polymer Technology
www.kunststofftech.com; www.plasticseng.com

eingereicht/handed in: 24.04.2013
angenommen/accepted: 19.07.2013

MSc ME ETH Mario Studer, Prof. Dr. –Ing. Frank Ehrig
Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung, Hochschule für Technik
Rapperswil, Schweiz

Reduktion von Formteilverzug beim Spritz- giessen durch optimale Wanddickenverteilung – Eine Machbarkeitsstudie

Der Formteilverzug, das heisst die Abweichung der Formteil-Istgeometrie zur -Sollgeometrie, stellt nach wie vor ein zentrales Thema bei der Entwicklung von Spritzgiessformteilen dar. Während bisherige Massnahmen zur Verringerung des Verzugs mehrheitlich auf der Optimierung der Maschineneinstellparameter und Angusslage basierten, wird in der vorliegenden Veröffentlichung eine Methode vorgestellt, mit welcher der Verzug von Spritzgussformteilen durch Optimierung der Wanddickenverteilung reduziert werden kann. Die Methode beruht auf einem evolutionären Optimierungsalgorithmus, welcher direkt mit der Spritzgussimulation gekoppelt ist und ohne Eingreifen des Benutzers eine optimale Geometrie für die Werkzeugkavität in Form einer STL-Datei generiert. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurde die Leistungsfähigkeit der Methode an einer einfachen Testgeometrie ermittelt.

Minimization of warpage of injection-molded parts through ideal wall thickness distribution - a feasibility study

The injection molded parts warpage, represented by the geometric difference between the actual and the target part, is a permanent problem during the development of new injection molded parts. While most efforts to reduce the part warpage have resulted in optimization of the processing parameter and gate location, this study presents a method which aims to reduce the part warpage by optimization of its wall thickness distribution. This method is based on an evolutionary optimization algorithm, which interacts with the injection moulding simulation. The procedure is fully automatic and results in a STL-File for the optimized geometry of the cavity. The objective of the present study is to evaluate the efficiency of this method for a non-complex geometry.

Reduktion von Formteilverzug beim Spritzgießen durch optimale Wanddickenverteilung – eine Machbarkeitsstudie

N. Studer, F. Ehrig

Im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie wird eine Methode zur automatischen Verringerung des Formteilverzugs von Spritzgussformteilen vorgestellt. Die Methode basiert auf einem Optimierungsalgorithmus, der die Wanddickenverteilung des Formteils grossflächig über abschnittsweise definierte bi-quadratische Verteilungsfunktionen innerhalb bestimmter Grenzen hinsichtlich minimalen Verzugs optimiert. Dazu wurde eine vollautomatische Optimierungsroutine, bestehend aus Geometrieerzeugung, Spritzgussimulation und Optimierungsalgorithmus entwickelt und an einer einfachen, symmetrisch aufgebauten Testgeometrie aus ASA Luran S 757R für zwei unterschiedliche Angusspositionen evaluiert. Als Optimierungsalgorithmen wurden die Downhill-Simplex-Methode und ein genetischer Algorithmus eingesetzt und hinsichtlich Lösungsgüte sowie Konvergenzverhalten untersucht.

1 EINLEITUNG

Die mit der Globalisierung der Märkte einhergehende Verkürzung der Produktlebenszyklen macht bei der Entwicklung neuer Produkte den Einsatz der computerunterstützten Produktentwicklung (CAE) unabdingbar. Ziele sind die Reduktion der Entwicklungskosten und die Erreichung einer frühen Serienreife [1]. Im Gegensatz zu den klassischen Konstruktionswerkstoffen ist bei der Entwicklung von Spritzgießformteilen der Einsatz der CAE noch umfassender, da der Herstellungsprozess ebenfalls mitberücksichtigt werden muss. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind aus der Forschung der vergangenen 60 Jahre mehr als ein halbes Dutzend kommerziell erhältliche Spritzguss simulationsprogramme hervorgegangen [2]. Diese lösen die für den Formfüll- und Abkühlvorgang massgebenden Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und Energie. Als Ergebnis liegen u.a. quantitative Informationen über das Schwindungs- und Verzugsverhalten vor.

Um die Ergebnisse zur Vermeidung von kosten- und zeitintensiven Werkzeugänderungen nutzen zu können, muss eine hinreichende Ergebnisqualität vorliegen. Dies ist zumindest bei den amorphen Thermoplasten der Fall, während bei teilkristallinen und faserverstärkten Thermoplasten die Verzugsberechnungen zum Teil grosse Abweichungen aufweisen können [3]. Mitunter ein Grund für die mangelnde Ergebnisqualität liegt in der komplexen Morphologie und der fehlenden Abbildung der Mikroebene dieser Werkstoffe. Erste Lösungsansätze dazu liegen bereits vor. Michaeli und Baranowski veröffentlichten

ein Modell, das den Kristallisationsvorgang auf der Mikroebene berechnet und die daraus resultierenden lokalen Eigenschaftswerte in der Verzugsberechnung berücksichtigt [4]. Möbius et al. präsentierten ein Modell, bei dem die Mechanik der Fasern vereinfacht abgebildet wird, wodurch Faserbrüche und daraus folgende Änderungen der Orientierung sowie der Mechanik berücksichtigt werden können [5]. Bis diese Modelle zum Stand der Technik zählen, werden mit Bestimmtheit noch einige Jahre vergehen.

Während also die Genauigkeit der Simulationsprogramme laufend gesteigert wird, mangelt es in der Praxis im Falle von inakzeptablen Verzugswerten an Möglichkeiten, diese ohne grosses Prozesswissen von Spezialisten in ein akzeptables Mass zu lenken. Daher mag es nicht erstaunen, dass gemäss einer Firmenschrift der Du Pont de Nemours GmbH der Formteilverzug zu den zehn meistgenannten Problemen der Spritzgiessverarbeitung zählt [6].

Ausgehend der Wahl eines möglichst verzugsarmen Werkstoffes, hat die Forschung einige interessante Ansätze zur automatisierten Verzugsoptimierung hervorgebracht [7-25]. Diese lassen sich in drei Hauptmassnahmen zur Verzugsminimierung bestehend aus der Optimierung von Prozessparametern [7-17], Angusslage [18-23] und Wanddickenverteilung [24, 25] kategorisieren [26].

Gemäss den mit diesen Ansätzen erzielbaren Ergebnissen erweist sich der Ansatz zur Optimierung der Wanddickenverteilung als besonders geeignet. Grund dafür ist einerseits die vielschichtige Wirkweise der Wanddicke auf den Formgebungsprozess. Durch die Wanddickenverteilung lässt sich das Formfüll-, das Abkühl- und letzten Endes das Druckübertragungsverhalten sowohl global als auch lokal beeinflussen. Zudem schränkt die Wanddickenverteilung das Prozessfenster nicht unnötig ein, wie das bei der Optimierung der Prozessparameter der Fall sein kann, und ist im Gegensatz zur Variation der Angusslage in der Regel geringeren Restriktionen unterworfen. Lee und Kim erzielten damit für ein geometrisch komplexes Bauteil und mit PP als Werkstoff Reduktionen der Verzugswerte von bis zu 70% [24].

Weiter zeigen die Untersuchungen von Lee und Kim [24, 25], dass eine optimale Wanddickenverteilung zu einem robusteren Prozessverhalten führen kann, indem der Verzug der optimierten Geometrie toleranter auf Veränderungen der Maschineneinstellparameter reagiert. Diese Tatsache würde grundsätzlich eine gestufte Optimierung zulassen, indem im Anschluss an die Optimierung der Wanddickenverteilung die Prozessparameter hinsichtlich minimalen Verzugs optimiert werden.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird der Ansatz von Lee und Kim [24, 25] aus dem Jahre 1995 weiterverfolgt und entsprechend heutiger CAE-Möglichkeiten ausgebaut. Anstelle der von Lee und Kim verwendeten diskreten Wanddickenverteilung wird die Wanddicke abschnittsweise über eine bi-quadratische Funktion variiert. Mit diesem in der Finite Elemente Methode etablierten Ansatz können mit wenigen Funktionsparametern grossflächige und stetige Wanddickenänderungen vorgenommen werden. Im Vergleich zur diskreten Wanddickenänderung reduziert sich dadurch der Lösungsraum erheblich. Wei-

ter wird neben der von Lee und Kim eingesetzten Downhill-Simplex-Methode ein genetischer Algorithmus verwendet und deren Lösungsgüte ermittelt. Die für die Optimierung erforderlichen Verzugsresultate werden mit dem Spritzguss-simulationsprogramm Cadmould® 3D-F CMV6 der Fa. Simcon, kunststofftech-nische Software GmbH Würselen, generiert und direkt dem Optimierungsalgo-rithmus übergeben. Dabei wird die Wanddickenverteilung ohne Eingreifen eines Benutzers iterativ optimiert, bis möglichst minimale Verzugsresultate resultieren. Am Ende der Optimierung liegt die optimale Geometrie für die Werkzeugkavität in Form einer Stereolithografie(STL)-Datei vor.

2 UMSETZUNG DER VOLLAUTOMATISCHEN VERZUGS-OPTIMIERUNG

Zur Umsetzung der vollautomatischen Verzugsoptimierung gilt es unterschiedliche Programme über eine gemeinsame Schnittstelle zusammenzuführen. Wie in Bild 1 ersichtlich ist, setzt sich die komplette Optimierungsroutine aus einem Geometrieerzeugungsprogramm, dem Spritzguss-simulationsprogramm und dem Optimierungsalgorithmus zusammen.

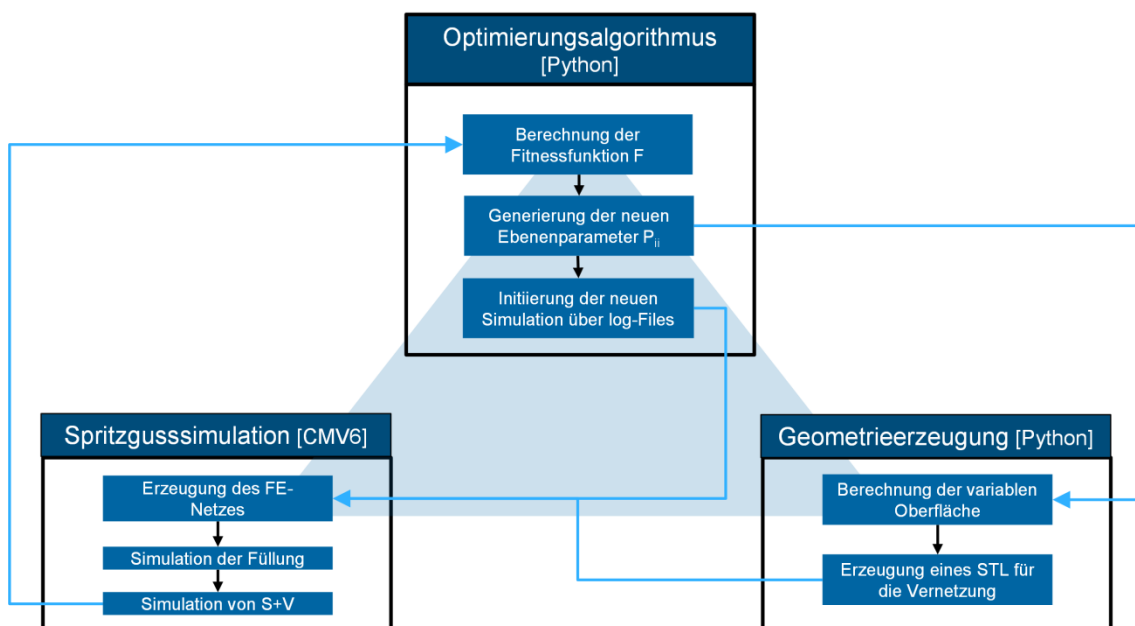


Bild 1: Schema der Umsetzung einer vollautomatischen Optimierungsroutine

Der in der Programmiersprache Python definierte Optimierungsalgorithmus bildet den zentralen Punkt der Routine. Ausgehend von initialen Wanddickenverteilungsparametern P_{ij} , welche die Wanddickenverteilung über der gesam-

ten Bauteiloberfläche charakterisieren, wird vom Geometrieerzeugungstool die für die Simulation notwendige Geometriedatei im Dateiformat STL erzeugt und zusammen mit den Material- und Prozessparametern dem Spritzgusssimulationsprogramm übergeben. Darin wird aus den Geometrieinformationen ein Finite-Elemente-Netz generiert und die Schwindungs- und Verzugssimulation durchgeführt. Nach Abschluss der Simulation werden die Ergebnisse dem Optimierungsalgorithmus übergeben, welcher die Fitness, bestehend aus der Summe von Verzugswerten, der aktuellen Geometrie bewertet und bei unzureichendem Ergebnis neue Wanddickenverteilungsparameter für einen erneuten Durchlauf bestimmt. Diese Routine wird solange wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist.

Die für die Simulation erforderlichen Prozessparameter bleiben während der Optimierung unverändert und werden zu Beginn der Optimierung an der Geometrie mit der initialen Wanddicke nach den Richtlinien der Kunststoffverarbeitung ermittelt.

2.1 Geometrieerzeugung mit variabler Wanddicke

Für die vorliegende Untersuchung wurde für die Geometrieerzeugung mit variabler Wanddicke ein pragmatischer Ansatz gewählt, indem kein CAD-Programm eingesetzt, sondern die Geometrie über mathematische Zusammenhänge durch Generierung von Oberflächenpunkten erzeugt wird. Grund dafür ist einerseits die Unabhängigkeit von weiteren kommerziellen Softwareprodukten. Andererseits ist dadurch eine einfache Implementierung in die Optimierungsroutine möglich.

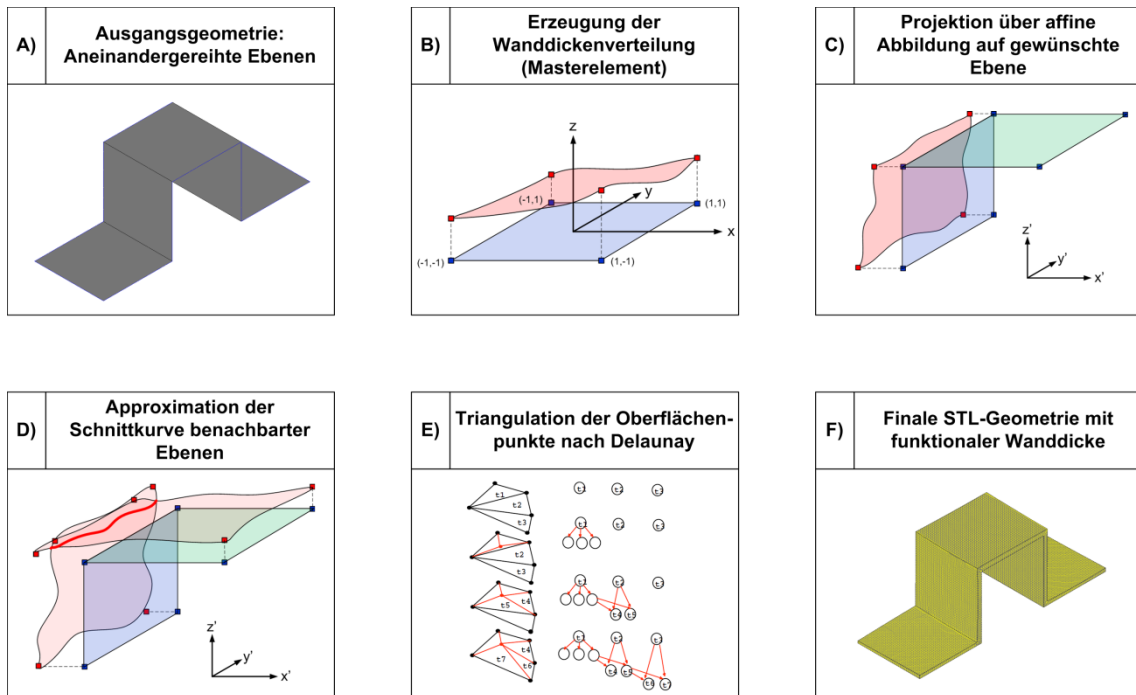


Bild 2: Teilschritte zur Erzeugung von Geometrien mit variablen Wanddicken

Wie aus Bild 2 hervorgeht, wird ausgehend von einzelnen aneinandergereihten Ebenen (A) für jeden Ebenenabschnitt ein Masterelement mit definierter Wanddickenverteilungsfunktion erzeugt (B), diese mittels affiner Abbildung (einseitig) auf die originale Ebene projiziert (C), die sich zwischen zwei Ebenenabschnitten ergebenden Schnittkurven berechnet (D) und alle Oberflächenpunkte nach Delaunay [27] trianguliert (E), so dass am Ende ein funktionales STL-File mit bestimmter einseitiger Wanddickenverteilung vorliegt (F).

Dadurch können einfache Geometrien mit variabler Wanddicke generiert werden und pro Ebene eine mehr oder weniger beliebige Wanddickenverteilungsfunktion zur Parameteroptimierung eingesetzt werden. Allfällige Radien lassen sich damit nicht erzeugen.

Um der optimalen Wanddickenverteilung möglichst viel Freiraum zu lassen und die Anzahl der Optimierungsparameter niedrig zu halten, wird jedem Masterelement mit $x = [-1 \dots 1]$ und $y = [-1 \dots 1]$ eine biquadratische Funktion (1) zugeordnet.

$$z_i(x, y) = (P_{i1} + P_{i2} \cdot x + P_{i3}x^2) \cdot (P_{i4} + P_{i5} \cdot y + P_{i6}y^2) \tag{1}$$

Dadurch wird zum Beispiel eine Geometrie g , bestehend aus fünf aneinandergereihten Ebenen eine Funktion von 30 Parametern $g(P_{ij})$. Dies ist in Bild 3 ersichtlich.

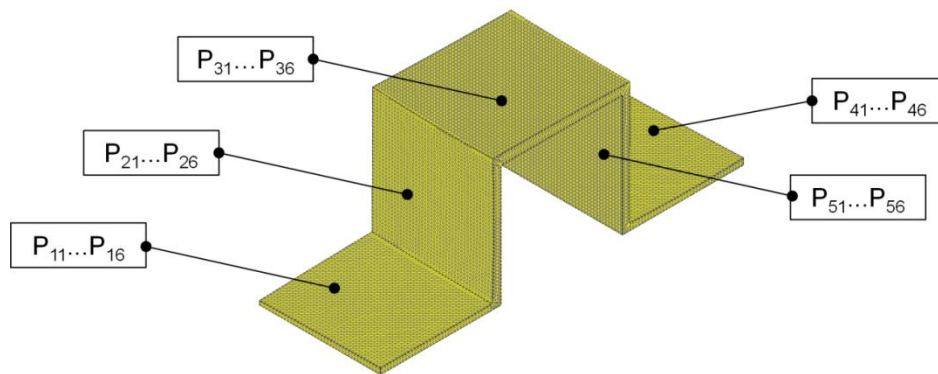


Bild 3: Beispiel einer Geometrie bestehend aus fünf aneinander gereihten Ebenen

2.2 Spritzgiesssimulation mit Cadmould® 3D-F CMV6

Die rheologische Simulation wird mit dem Cadmould® 3D-F CMV6 der Simcon kunststofftechnische Software GmbH durchgeführt. Dieses besonders für wissenschaftliche Zwecke dienliche Simulationstool lässt sich über Kommandozeilenbefehle ansteuern und dadurch entsprechend einfach automatisieren.

In Cadmould® 3D-F CMV6 werden bei der Füll- und Nachdruckphase die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie über eine Verallgemeinerung der von Hieber [28] veröffentlichten generalisierten Hele-Shaw-Approximation gelöst [29]. Die Hele-Shaw-Approximation wird dabei genutzt, um die Schmelzeausbreitung zwischen zwei parallelen, unendlich ausgedehnten, zeit- und ortsfesten Wänden zu berechnen. Dadurch vereinfachen sich die Navier-Stokes-Gleichungen auf folgende vier Hauptgleichungen [28]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_0^h \rho u \, dz \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_0^h \rho v \, dz \right) = \int_0^h \frac{d\rho}{dt} \, dz \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \tag{4}$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k_{th} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma} \tag{5}$$

Darin bedeuten h die halbe Dicke des ebenen Strömungsquerschnittes, x und y sind die Strömungsrichtungen, z die Dickenrichtung, u und v die Geschwindigkeitskomponenten in x - bzw. y -Richtung, ρ die Dichte, c_p die spezifische Wärmekapazität, k_{th} der Wärmeübergangskoeffizient, T die Temperatur p der Druck, $\eta(\dot{\gamma}, T, p)$ die Scherviskosität, und $\dot{\gamma}$ die Schergeschwindigkeit.

Dabei werden die Randbedingungen für Wandhaftung (6a) und Symmetrie (6b) berücksichtigt:

$$u = v = 0, \quad T = T_W \quad | \quad z = h \tag{6a}$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad | \quad z = 0 \tag{6b}$$

Durch partielle Integration können die Gleichungen auf die bekannte Hele-Shaw-Formulierung [30] gebracht werden. Für die Geschwindigkeitskomponenten erhält man:

$$u = -\frac{\partial p}{\partial x} \int_z^h \frac{\tilde{z}}{\eta} d\tilde{z}, \quad v = -\frac{\partial p}{\partial y} \int_z^h \frac{\tilde{z}}{\eta} d\tilde{z} \tag{7}$$

und für die Gleichung zur Bestimmung des Druckes:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \int_0^h \frac{d\rho}{dt} dz \quad \text{mit} \quad S = \int_0^h \rho \int_w^h \frac{z}{\eta} dz dw \tag{8}$$

In Cadmould® 3D-F CMV6 werden diese Gleichungen in einem semi-volumetrischen Finite-Elemente Netz gelöst. Das System besteht aus flächigen Dreieckselementen, welche die Bauteiloberfläche diskretisieren, und aus eindi-

mensionalen Rohrelementen, welche das von den Oberflächenelementen umschlossene Volumen im Inneren des Bauteils beschreiben (Bild 4).

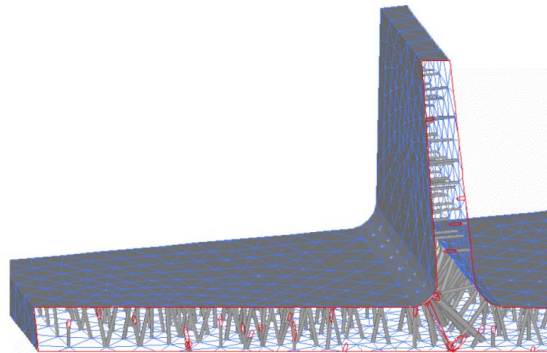


Bild 4: Oberflächentechnologie der Fa. Simcon zur Berechnung von Strömungsvorgängen innerhalb und quer zur Ebene (Die Rohrelemente sind zur besseren Erkennbarkeit mit geringerem Durchmesser dargestellt.) [29]

Bei der 3D-Fachwerkstechnologie (3D-F) sind generell alle Knoten miteinander verbunden. Dadurch kann sich die Schmelze sowohl in Ebenen-, als auch in Dickenrichtung ausbreiten, was eine gute Annäherung an die dreidimensionale Finite-Volumen-Beschreibung bei erheblich geringerem Rechenaufwand darstellt.

Die Berechnung des Schmelzefortschrittes und des Druckfeldes findet nach der Finite-Elemente-Methode statt (Methode nach Galerkin), während das Temperaturfeld über die Finite-Differenzen-Methode berechnet wird [31].

Neben der Simulation der Füll- und Nachdruckphase, berechnet das Cadmould® 3D-F CMV6 über ein Zusatzmodul auch das Abkühlverhalten in- und ausserhalb des Spritzgiesswerkzeuges, woraus sich die Schwindungs- und Verzugsergebnisse ableiten lassen. Dabei werden die auf behinderter Wärme-dehnung und ungleichmässiger Abkühlung basierenden Spannungen σ_{ij} im Formteil über einen viskos-thermo-elastischen Ansatz berechnet:

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} 0, & T > T_{NF} \\ - \int_0^t K \left(\alpha_v \frac{\partial T}{\partial t'} - \frac{\partial \epsilon_{kk}}{\partial t'} \right) dt' + 2G \int_0^t \frac{\partial}{\partial t'} \left[\epsilon_{ij} - \frac{\delta_{ij} \epsilon_{kk}}{3} \right] dt', & T \leq T_{NF} \end{cases} \quad (9)$$

Dieser zeichnet sich aus, dass sich das Material oberhalb einer bestimmten No-Flow-Temperatur T_{NF} rein viskos verhält und daher keine Spannungen aufgebaut werden. Unterhalb der No-Flow-Temperatur verhält sich das Material wie ein thermo-elastischer Festkörper, dessen Spannungen sich aus einem hydrostatischen und einem deviatorischen Anteil zusammensetzen (9).

Der darin enthaltenen Elastizitätskennwert für Kompression K sowie der volumetrische Ausdehnungskoeffizient α_v werden in Abhängigkeit von Druck p und Temperatur T aus den pvT -Daten, das heisst dem spezifischen Volumen v in Funktion von Druck und Temperatur, gewonnen:

$$\alpha_v = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p, K^{-1} = \kappa = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \quad \text{mit } \rho = v^{-1} \quad (10)$$

Die Elastizitätskonstante für Schub G wird in Abhängigkeit der Temperatur berücksichtigt. Als No-Flow-Temperatur wird bei den teilkristallinen Thermoplasten die Kristallisationstemperatur und bei den amorphen Thermoplasten die Glasübergangstemperatur verwendet. Beide Werte werden ebenfalls aus den pvT -Daten gewonnen, wobei ersterer mit der starken Abnahme des spezifischen Volumens über der Temperatur und die Glasübergangstemperatur mit dem Knick im temperaturabhängigen Verlauf des spezifischen Volumens korrespondieren (Bild 5).

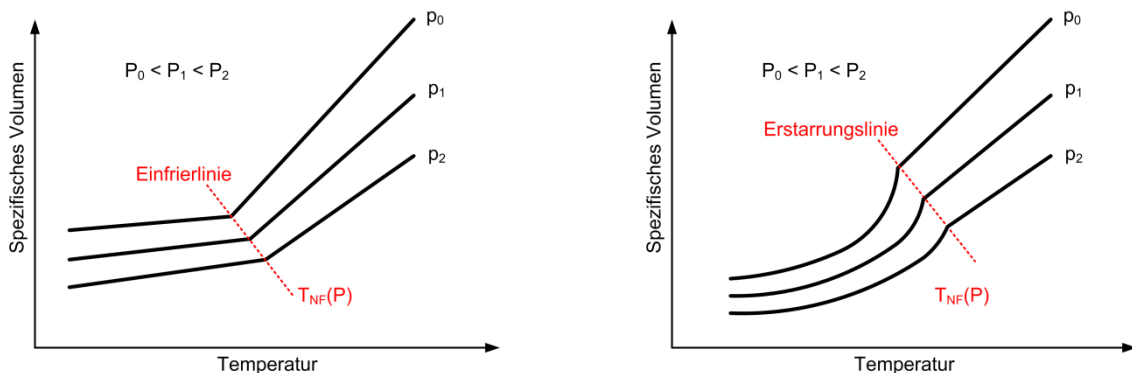


Bild 5: Näherungsweise Bestimmung der No-Flow-Temperatur aus den pvT -Daten [33]

links: Amorphe Thermoplaste
rechts: Teilkristalline Thermoplaste

Zur Lösung der konstitutiven Gleichung (9) werden unterschiedliche Randbedingungen herangezogen. Es wird an der Kontaktstelle zwischen Formteil und Werkzeugwand Haftung angenommen. Demzufolge werden die FE-Knoten an

der Formteiloberfläche bis zum Zeitpunkt der Entformung fixiert. Nach der Entformung wird diese Fixierung soweit reduziert, dass die Lagerung noch statisch bestimmt ist. Dadurch kann sich das Formteil frei verformen.

Die Randbedingungen für den Wärmeaustausch zwischen Formteil und Umgebung werden sinngemäss identisch definiert. In der Einspritzphase wird ein wanddickenabhängiger Wärmeübergangskoeffizient verwendet, welcher in der anschliessenden Nachdruck- und Restkühlphase auf einen konstanten Wert von $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ gesetzt wird, was gut in Einklang zu den umfangreichen experimentellen Untersuchungen von Blum [32] steht. Nach der Entformung beträgt der Wärmeübergangskoeffizient den für natürliche Konvektion an der Luft näherungsweise geltenden Wert von $8 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Zur Berechnung der globalen Deformationen, der aus Schalen- und Stabelementen aufgebauten Struktur, dienen die Stabelemente zur mechanischen Kopplung von gegenüberliegenden Oberflächenelementen (vgl. Bild 4) [29].

Der in Cadmould[®] 3D-F CMV6 verwendete Rechenansatz für die Spannungsberechnung (9) stellt eine starke Vereinfachung des realen Materialverhaltens von Kunststoffen dar. Kunststoffe verhalten sich in der Realität über das bei der Verarbeitung vorliegende Temperaturspektrum viskoelastisch [33]. Bei hohen Temperaturen relaxieren die Spannungen aufgrund der hohen Molekülbeweglichkeit entsprechend rascher als bei tiefen Temperaturen. Für die Spannungsberechnungen kommen so genannte Gedächtnisintegrale zum Einsatz, welche die gesamte Deformationsgeschichte mitberücksichtigen [33]. Bei hohen Beanspruchungen müsste zudem der Beanspruchungshöhe Rechnung getragen werden, indem die Relaxationszeiten zusätzlich zur Temperatur auch in Funktion der Spannung gesetzt werden. Auch sind alle Materialeigenschaften in der Realität von der Molekülorientierung abhängig, die sich bei der Formfüllung einstellt [33]. Die Materialmodelle müssten genau genommen um die Anisotropie erweitert werden. Weiter beeinflusst auch die Abkühlgeschwindigkeit sowohl das pvT-Verhalten, als auch die thermischen Eigenschaftswerte. Die Verwendung der Übergangstemperaturen aus dem pvT-Diagramm zur Bestimmung der No-Flow-Temperaturen stellt auch einen kritischen Aspekt dar, weil kein direkter Bezug zum Fließverhalten vorliegt. Diesen würde man besser in einem Scherversuch realisieren, z.B. im Rotationsviskosimeter, und dabei prüfen, bei welcher Temperatur unter vorgegebener Last keine signifikante Scherung mehr eintritt. Als letzter kritischer Punkt gilt es noch den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen dem Kunststoff und der Werkzeugwand zu erwähnen, der in der Realität auch vom Schmelzedruck in der Kavität, der Kavitätsoberflächenbeschaffenheit und der Materialpaarung abhängig ist [32].

Die Berücksichtigung aller Aspekte würden einerseits einen erheblichen Versuchs- und Rechenaufwand bedingen. Andererseits existieren messtechnische Schwierigkeiten, um beispielsweise das anisotrope oder kühlratenabhängige Verhalten korrekt erfassen zu können.

2.2.1 Definition des Formteilverzugs

Für die vorliegende Untersuchung wird der Formteilverzug V_K an der Stelle K als Abstandsvektor zwischen der Ist-Geometrie p_{Ist_K} und der Soll-Geometrie p_{Soll_K} festgelegt:

$$V_K = p_{Ist_K} - p_{Soll_K} \tag{11}$$

Als Ist-Geometrie wird die Punktwolke des Bauteils verstanden, welche am Ende des simulierten Spritzgusszyklus vorliegt. Dazu berechnet das Simulationsprogramm zunächst die Schwindungs- und Verzugswerte bis zu einer definierten Kühlzeit unter Formzwang und hebt diesen anschliessend auf, wodurch das Formteil ohne Formzwang auf Raumtemperatur abkühlt.

Als Soll-Geometrie werden die Datenpunkte der Kavität herangezogen und über den Iterative-Closest-Point(ICP)-Algorithmus solange transformiert (Translation, Rotation und isotrope Skalierung), bis die beste Übereinstimmung zur simulierten Geometrie vorliegt. Die Summe der Abstandskquadrate zwischen transformierter Kavität und Simulation wird dabei durch Optimierung der Transformationsmatrix T minimiert [34]:

$$\min_{T, j \in \{1, 2, \dots, N_S\}} \left(\sum_{i=1}^{N_K} \|T p_{Soll_i} - p_{Ist_j}\|^2 \right) \tag{12}$$

Bei diesem Vorgang wird quasi die Kavität in der realen Geometrie „zentriert“, was in Bild 6 anschaulich dargestellt werden soll. Mit der Minimierung des Formteilverzugs über die Formulierungen (11) und (12) wird durch die Optimierungsroutine somit ein möglichst isotropes Schwindungsverhalten angestrebt.

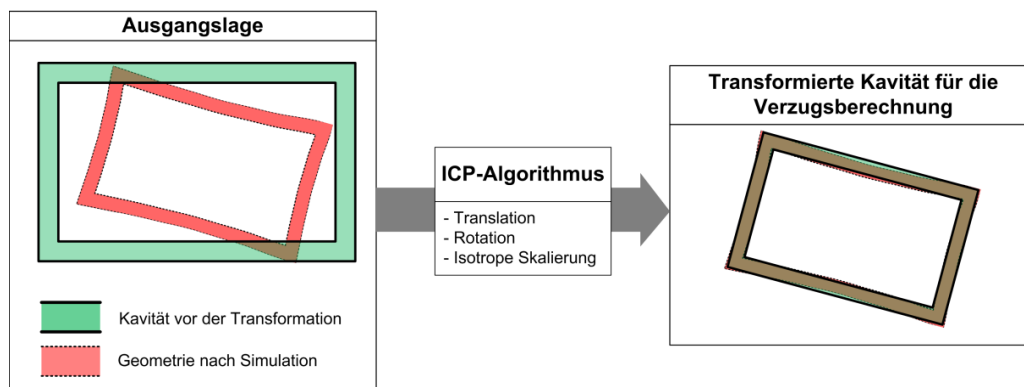


Bild 6: Visualisierung des ICP-Algorithmus zur Bestimmung des Formteilverzugs

2.3 Formulierung eines Optimierungsalgorithmus

Zur Lösung von Optimierungsaufgaben wird eine globale objektive Funktion f in Abhängigkeit der für die Optimierung verfügbaren Designvariablen x benötigt. In der Regel wird die objektive Funktion so definiert, dass deren Funktionswert beim besten Design möglichst klein ausfällt. Dies führt zur folgenden allgemeinen Formulierung des Optimierungsproblems:

$$\min_x \{f(x)\} \quad (13)$$

Übertragen auf die vorliegende Problemstellung setzt sich die objektive Funktion aus der Summe der Verzugsvektorbeträge $|V_K|$ zusammen, welche in Abhängigkeit von den Funktionsparametern P_{ij} vorliegt. Die Summe kann entweder über alle Stellen der Geometrie erfolgen, oder nur an charakteristischen Stellen der Geometrie gebildet werden. Zur stärkeren Gewichtung von Ausreißern werden die einzelnen Verzugsvektorbeträge quadriert. Für die objektive Funktion f_V folgt damit:

$$f_V(P_{ij}) = \sum_{k=0}^n |V_K(P_{ij})|^2 \quad (14)$$

2.3.1 Einbezug von Randbedingungen

Damit die Optimierung praktikable Geometrien generiert, sind entsprechende Randbedingungen zu definieren. Als praktikabel werden vorerst Geometrien erachtet, deren Wanddicken h ein bestimmtes Spektrum $[h_{min} \dots h_{max}]$ nicht überschreiten. Die Berücksichtigung fertigungsgerechter Aspekte, wie die Entformbarkeit des Bauteils oder lokale Druckminima, welche zu Einfallstellen oder Lunken führen können, findet aktuell nicht statt. Diese könnten zusätzlich, als Randbedingungen aufgenommen und in den Algorithmus eingearbeitet werden.

Der Einbezug von Randbedingungen in ein Optimierungsproblem gelingt am einfachsten, indem die objektive Funktion $f_V(P_{ij})$ mit einer zusätzlichen Straffunktion $f_S(P_{ij})$ erweitert wird (15). Für die globale objektive Funktion f gilt damit:

$$f(P_{ij}) = f_V(P_{ij}) + f_S(P_{ij}) \quad (15)$$

Die Straffunktion wird so definiert, dass bei Überschreitung der oberen und Unterschreitung der unteren Wanddickengrenze ein zusätzlicher Strafwert addiert wird. Um Grenzbereiche nicht gänzlich auszuschließen, werden zwei Sigmoidfunktionen $S_{i,max}(P_{ij})$ und $S_{i,min}(P_{ij})$ definiert (Gl. 16a und 16b), deren Änderung der Funktionswerte über den Parameter a gut gesteuert werden können (vgl. Bild 7).

$$S_{i,max}(P_{ij}) = \frac{1}{1 + e^{-a(\max\{z_i(P_{ij})\}-h_{max})}} \tag{16a}$$

$$S_{i,min}(P_{ij}) = 1 - \frac{1}{1 + e^{-a(\min\{z_i(P_{ij})\}-h_{min})}} \tag{16b}$$

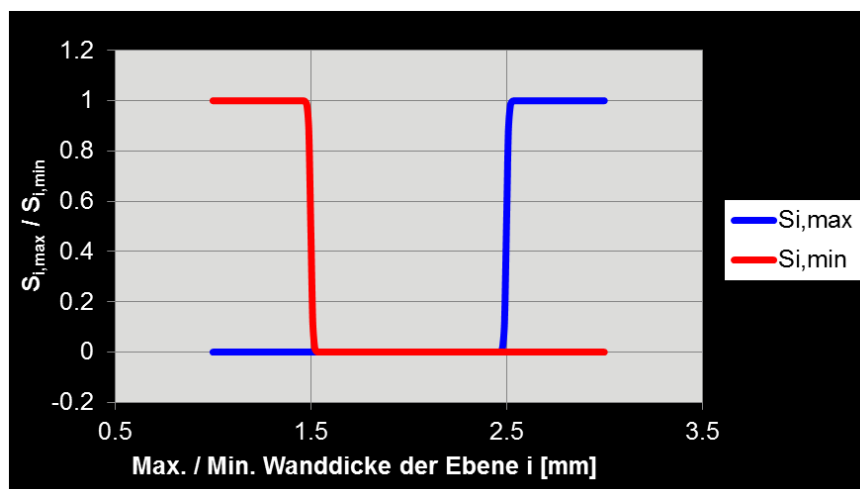


Bild 7: Verlauf der Sigmoidfunktionen zur Einschränkung der Wanddicken
Parameter: $a = 200$; $h_{min} = 1.5$ mm, $h_{max} = 2.5$ mm

In Bild 7 wird der Verlauf der Sigmoidfunktionen beispielhaft für eine untere Grenze der Wanddicke von 1.5 mm und eine obere Grenze von 2.5 mm gezeigt. In (16a) bzw. (16b) werden die maximale und minimale Wanddicke für jeden Ebenenabschnitt i der Geometrie anhand der Wanddickenverteilungsfunktion (1) über einem 25 x 25 - Gitter berechnet. Wanddicken in den approximierten Bereichen (Bild 2; Teilschritt D) bleiben dadurch unberücksichtigt, was unter Umständen bei komplexen Geometrien problematisch sein könnte.

Die Integration der Beziehung zur Berücksichtigung der Randbedingungen führt schliesslich auf folgende finale Beziehung für das Optimierungsproblem, worin die Sigmoidfunktionen über die Anzahl der Ebenen n_e aufsummiert und mit einem zusätzlichen Penaltyparameter C_{Pen} global gewichtet sind:

$$\min_{P_{ij}} \left\{ \sum_{k=0}^n |V_K(P_{ij})|^2 + C_{Pen} \sum_{i=1}^{n_e} [S_{i,max}(P_{i,j}) + S_{i,min}(P_{i,j})] \right\} \tag{17}$$

3 LÖSUNG DES OPTIMIERUNGSPROBLEMS

Die Schwierigkeit bei der Lösung des Optimierungsproblems (17) mit der Findung der besten Funktionsparameter für die Wanddickenverteilungsfunktionen (1) besteht darin, dass der funktionale Zusammenhang zwischen der objektiven Funktion (Formteilverzug) und den Designvariablen (Funktionsparameter der Wanddickenverteilung) im Allgemeinen nicht bekannt ist. Aus diesem Grund kann die Lösung des Problems nur über stochastische Optimierungsalgorithmen herbeigeführt werden. Mögliche Lösungsstrategien können u.a. folgende sein:

- a) Festlegung eines Zusammenhangs, z.B. über ein lineares Meta-Modell, welches durch Generierung von Funktionswerten über die Modellparameter optimiert wird.
- b) Iterative Generierung des lokalen funktionalen Zusammenhangs durch numerische Bildung partieller Ableitungen und Optimierung über die Verfolgung des steilsten Abstieges.
- c) Verwendung metaheuristischer Optimierungsverfahren, wie z.B. evolutionäre Algorithmen, die nach den Prinzipien der Evolution eine Lösung herbeiführen.

In den Strategien a) und b) lauert die Gefahr, dass durch unzureichende Definition des Zusammenhangs oder Vorhandensein mehrerer lokaler Minima keine optimale Lösung gefunden werden kann. Demgegenüber zeichnen sich die metaheuristischen Methoden dadurch aus, dass diese lokale Minima besser überwinden können, da sie in der Regel gleichzeitig an mehreren Orten im Lösungsraum wirken. Aus diesem Grund ist bei komplexen Zusammenhängen die Wahrscheinlichkeit grösser ein globales Optimum zu finden.

Von den zahlreichen metaheuristischen Optimierungsverfahren wird bei der vorliegenden Untersuchung, ein genetischer Algorithmus (GA) eingesetzt. Grund dafür sind einerseits dessen umfangreiche Erprobung an komplexen Optimierungsaufgaben [35-39] und andererseits die Eigenschaft der universellen Anwendbarkeit [39].

Zur Quantifizierung der Lösungsgüte des GA wird mit der Downhill-Simplex-Methode nach Nelder-Mead [40] noch ein zweiter, in der Ingenieurstechnik weit verbreiteter und in der Untersuchung von Lee und Kim [24, 25] für eine vergleichbare Problemstellung eingesetzter Optimierungsalgorithmus eingesetzt.

Im Folgenden wird nun etwas detaillierter auf die Funktionalität der beiden Algorithmen eingegangen.

3.1 Downhill-Simplex-Methode nach Nelder und Mead

Die Downhill-Simplex-Methode nach Nelder und Mead wurde bereits im Jahre 1965 veröffentlicht [40]. Diese eignet sich grundsätzlich zur Minimierung von Funktionen mit n Variablen. Ableitungen sind keine erforderlich. Deswegen, wie auch aufgrund der einfachen Implementierung in Computerprogramme, erfreut sich die Simplex-Methode in den Ingenieurwissenschaften einer grossen Beliebtheit.

Bei der Downhill-Simplex-Methode handelt es sich um einen direkten (deterministischen) Optimierungsalgorithmus, der über wiederholte Anwendung den Lösungsraum abtastet und im Normalfall zu einem lokalen oder globalen Optimum konvergiert.

Durch Generierung von Funktionswerten an $n + 1$ Stellen des Lösungsraums wird ein generalisierter Simplex aufgespannt, der durch schrittweise Anpassung des Eckpunktes mit grösstem Funktionswert auf die optimale Stelle hin kontrahiert. In Bild 8 wird dies am Beispiel einer Funktion mit zwei Variablen ($n = 2$) dargestellt.

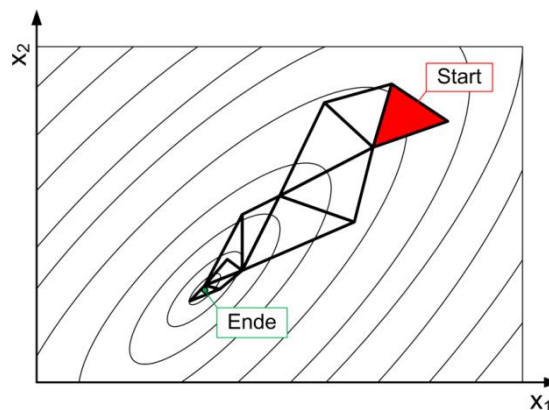


Bild 8: Beispiel der Optimierung mit der Downhill-Simplex-Methode bei einer Funktion mit zwei Variablen ($n = 2$)

Wie aus Bild 8 anschaulich hervorgeht, erfolgt die Optimierung der Funktionswerte nach den drei Grundprinzipien: Reflexion, Expansion, Kontraktion und Schrumpfung.

Zu Beginn der Optimierung werden ausgehend eines Startpunktes bzw. Startvektors x_1 n weitere Vektoren $[x_2 \dots x_{n+1}]$ generiert. Deren Funktionswerte $[f(x_1), \dots, f(x_{n+1})]$ bilden den Initial-Simplex, an welchem der in Bild 9 gezeigte Algorithmus angewandt wird:

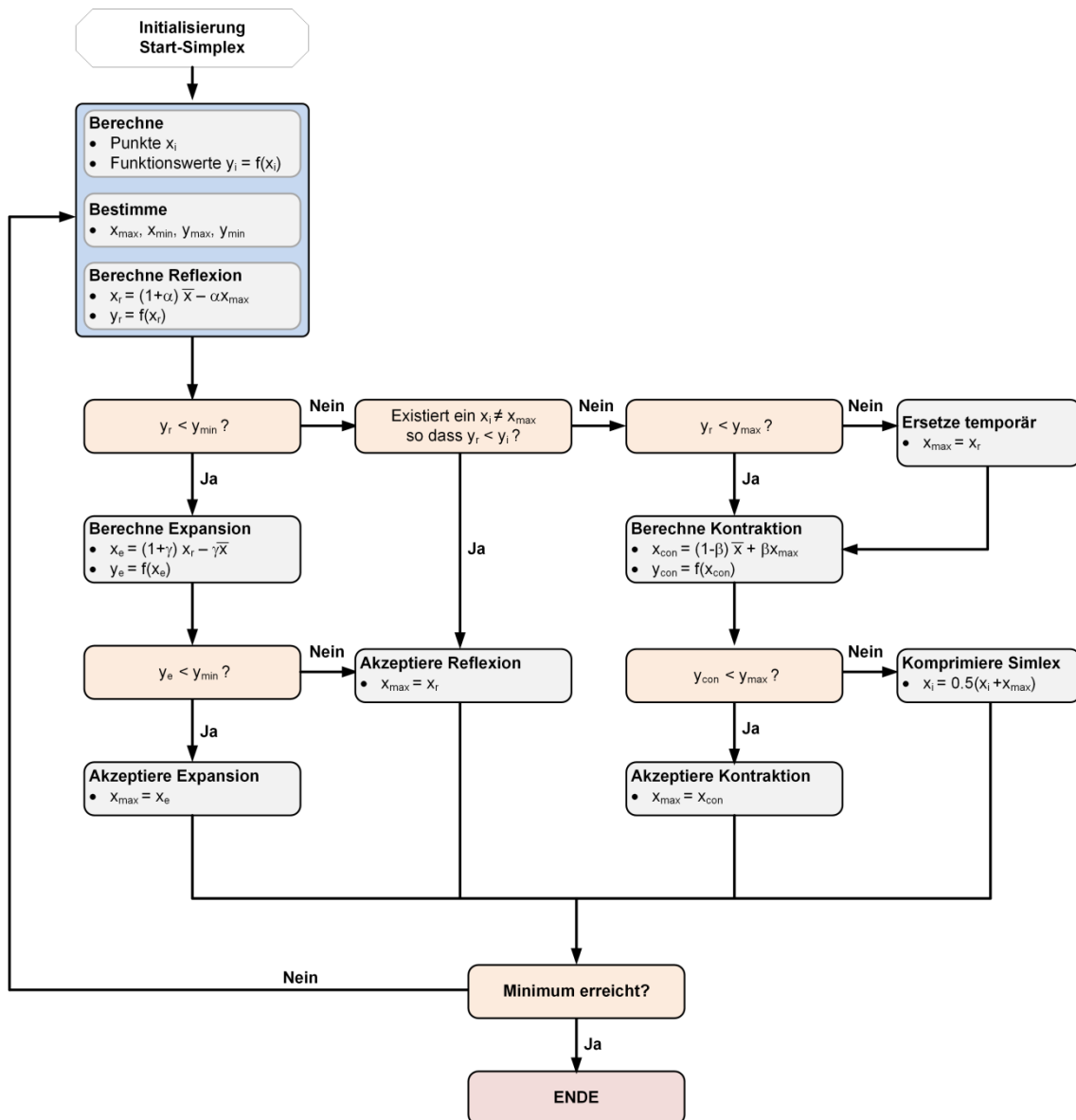


Bild 9: Rechenalgorithmus der Downhill-Simplex-Methode [40]

Die Iteration wird solange durchgeführt, bis ein entsprechendes Abbruchkriterium erreicht ist, welches im Idealfall als Konvergenzbedingung definiert wird. Das Konvergenzverhalten des Algorithmus ist neben der Wahl des Startvektors und der initialen Schrittlänge zur Generierung des Initial-Simplex von den Faktoren für die Reflexion, Expansion, Kontraktion und Schrumpfung abhängig. Nach Nelder und Mead führen folgende „Standard“-Werte zu einem befriedigenden Konvergenzverhalten [40]: $[R = 1, K = 0.5, E = 2, S = 0.5]$. Diese werden somit auch für die Simulation eingesetzt (vgl. Kap. 4).

3.2 Genetischer Algorithmus GA

Die vollständige Klärung der grundlegenden Mechanismen der Evolution, bestehend aus der Fortpflanzung durch Selektion, Mutation und Kreuzung, führte auf ein mächtiges und allgemeingültiges Werkzeug für die Optimierung diverser Problemstellungen. Holland [37] erkannte dieses Potential als einer der ersten, formulierte es mit einfach anwendbaren mathematischen Algorithmen und fand damit bereits im Jahre 1975 Lösungen für komplexe Optimierungsaufgaben.

Dem GA gehören eine Population, bestehend aus unterschiedlichen Individuen, und ein Satz biologisch inspirierter Algorithmen an [41]. Innerhalb des GA durchlaufen die in binäre Strings codierten Individuen (Genotyp) wiederholt die genetischen Operationen, bis am Ende nur noch diejenigen mit bester Fitness übrig bleiben. Die Terminologie des GA umfasst die Schritte: Initialisierung, Evaluation, Selektion und Reproduktion (Bild 10).

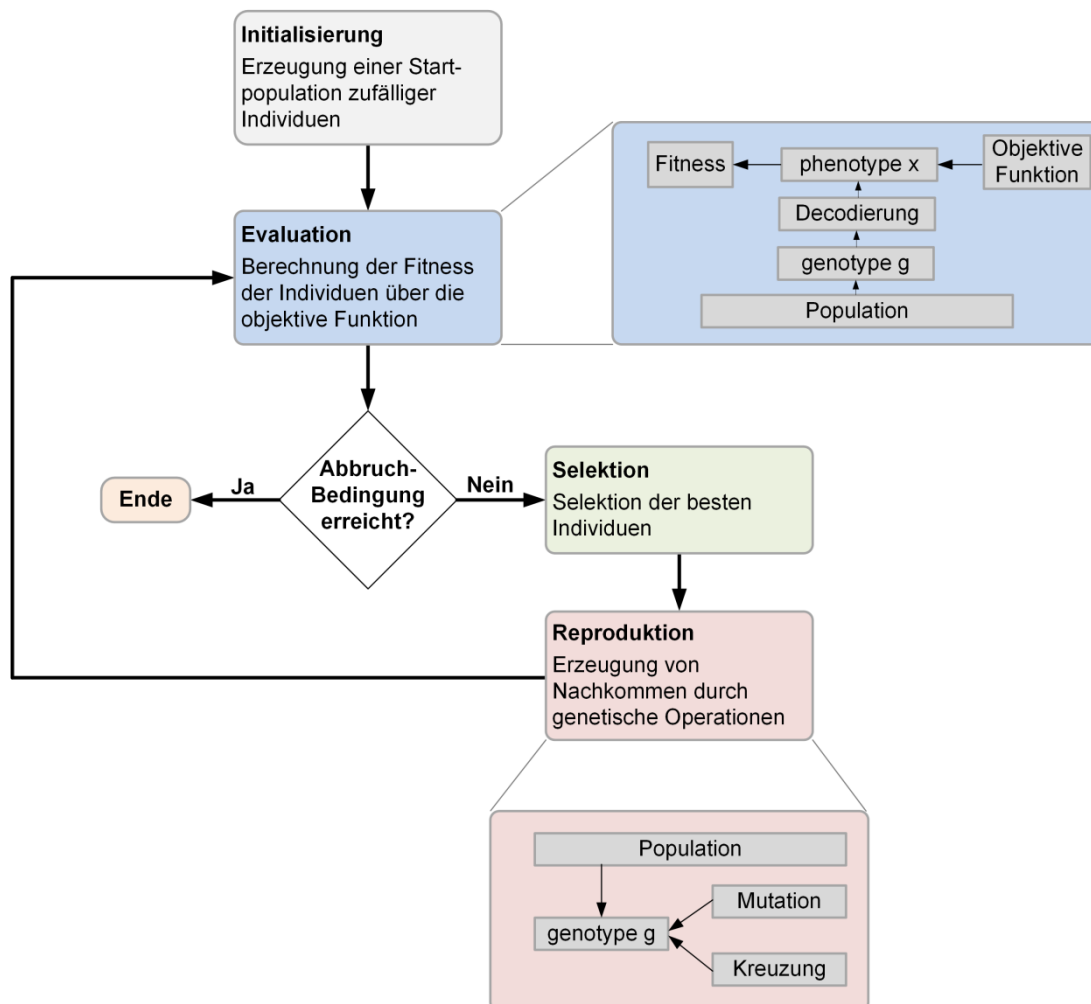


Bild 10: Terminologie des GA in Anlehnung an [42]

3.2.1 Initialisierung

In einem ersten Schritt wird der Algorithmus mit einer rein zufällig erzeugten Startpopulation, bestehend aus μ Individuen, initialisiert. Ein Individuum setzt sich dabei aus einem Set von Funktionsparametern $P_{i,j}$ zusammen. Zur Ausführung der genetischen Operationen wird jedes Individuum in einen binären String codiert. Die Funktionsparameter repräsentieren darin die einzelnen Bits (Bild 11).

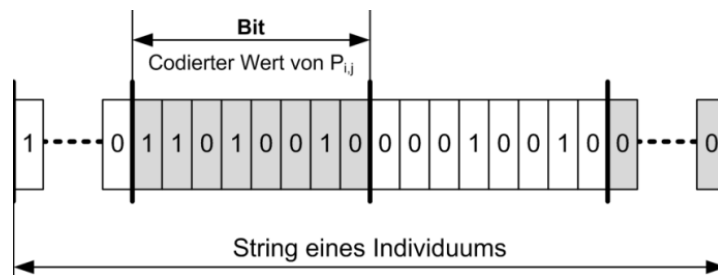


Bild 11: Binäre Lösungscodierung beim GA [42]

3.2.2 Evaluation

Im nächsten Schritt wird die Fitness der einzelnen Individuen bestimmt. Dazu werden die Strings decodiert und über die objektive Funktion bewertet. Jedem Individuum wird dadurch ein Funktionswert (Fitness) zugeordnet, der die Funktionserfüllung entsprechend quantifiziert.

3.2.3 Selektion

Bei der Selektion werden μ Individuen aus der aktuellen Population zur Bildung der Nachkommen ausgewählt. Dadurch hat die Selektion einen entscheidenden Einfluss auf das Konvergenzverhalten und die Lösungsgüte des GA [43]. Die Grundidee bei der Selektion besteht darin, Individuen mit besserer Fitness zu bevorzugen [44]. Möglichkeiten dazu sind zahlreich. Zu den wichtigsten traditionellen Suchalgorithmen zählen die fitnessproportionale, die rangbasierte und die Turnier-Selektion [43].

Bei der fitnessproportionalen Selektion wird jedem Individuum i eine Selektionswahrscheinlichkeit p_i zugeordnet, die proportional zu ihrer Fitness f_i ist (18).

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^{\mu} f_j} \quad (18)$$

Die Auswahl eines Individuums mit besserer Fitness ist dadurch wahrscheinlicher, was mit einem hohen Selektionsdruck gleichbedeutend ist und die globale Lösungskonvergenz gefährden kann [42].

Bei der rangbasierten Selektion wird den einzelnen Individuen nach deren Fitness ein Rang zugewiesen, wobei das beste Individuum den kleinsten Rang $R = [1, \dots, \mu]$ erhält. Jedem Individuum wird linear zu ihrem Rang R_i eine Selektionswahrscheinlichkeit p_i zugeordnet (19).

$$p_i = \frac{\mu - (R_i + 1)}{\sum_{j=1}^{\mu} R_j} \tag{19}$$

Bei der Turnierselektion werden rein zufällig eine Teilmenge k der Individuen ausgewählt und darin das beste Individuum selektiert.

Der jeweilige Selektionsalgorithmus wird solange durchlaufen, bis die Anzahl selektierter Individuen gerade der Populationsgrösse μ entspricht.

3.2.4 Reproduktion

Aus der Menge der selektierten Individuen werden $\mu/2$ mal mit gleicher Wahrscheinlichkeit zwei Individuen entfernt und zur Bildung der Nachkommen genetischen Operationen unterzogen. Neben dem wird meist das beste Individuum geklont (Elitismus). Als genetische Operationen gelangen der Reihe nach die Kreuzung und die Mutation mit jeweils unterschiedlich definierter Wahrscheinlichkeit zur Anwendung.

Bei der Kreuzung wird die Ausprägung U_k einer gleichverteilten Zufallsvariable bestimmt und mit der definierten Wahrscheinlichkeit für die Kreuzung p_k geprüft, ob eine Kreuzung eintritt [42]. Ist dies der Fall, dann findet an einer zufällig gewählten Stelle des Strings eine Kreuzung statt, indem die Stringabschnitte nach dieser Stelle vertauscht werden (Bild 12).

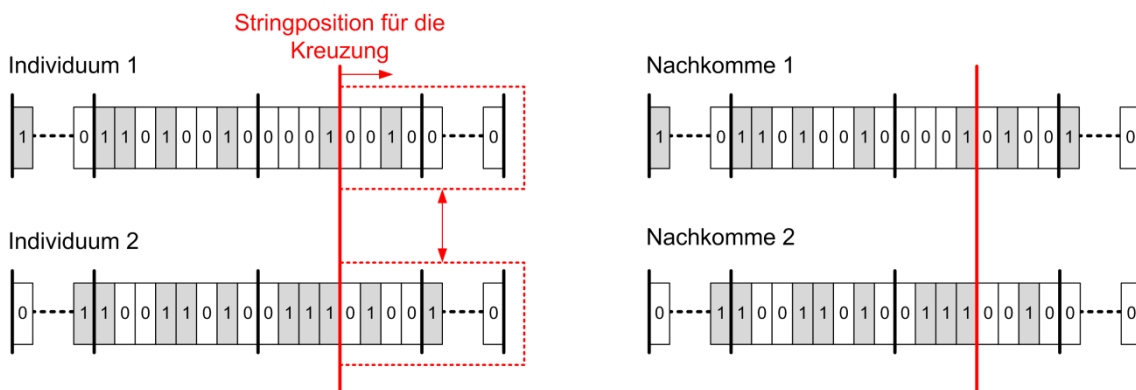


Bild 12: 1-Punkt Kreuzung [42]

Die Mutation findet im Anschluss an die Kreuzung statt. Dabei wird für jedes Bit aller Individuen die Ausprägung U_m einer gleichverteilten Zufallsvariable ermittelt und anhand der definierten Wahrscheinlichkeit der Mutation p_m geprüft, ob das Bit invertiert wird. (vgl. Bild 13)

3.2.5 Abbruchbedingung

Die Schritte Evaluation, Selektion und Reproduktion werden solange wiederholt, bis ein bestimmtes Konvergenzkriterium erfüllt ist, oder eine bestimmte Anzahl Generationen erzeugt wurden. In der Regel wird letzteres als Abbruchkriterium herangezogen.

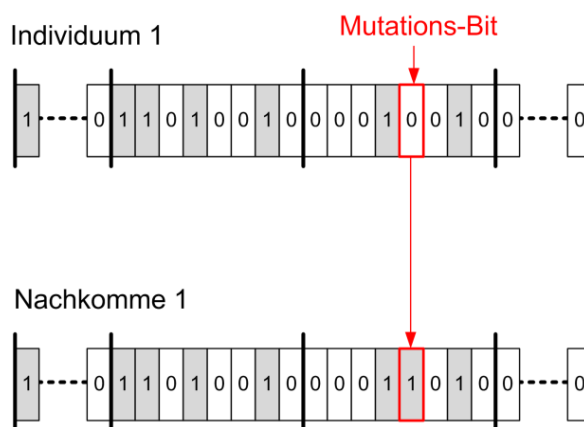


Bild 13: Mutation an einer Stelle des Strings (Bit) [42]

3.2.6 Einflussgrößen des GA

Die Konvergenz und Lösungsgüte der Optimierung können beim Einsatz des GA von vielen Faktoren abhängen. Neben dem Algorithmus für die Selektion und den vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten für die Kreuzung und Mutation kann auch die Populationsgröße einen entscheidenden Einfluss haben, da diese vorgibt, welche Stellen im Lösungsraum parallel bearbeitet werden. Die entsprechenden Werte sind in der Regel problemspezifisch. Zur Orientierung werden in der Tabelle 1 einige Empfehlungen aufgeführt, welche z.B. in [42] dokumentiert sind.

| Einstellwerte für den GA | |
|-----------------------------|----------------------------|
| Kreuzungswahrscheinlichkeit | $p_k \geq 0.6$ |
| Mutationswahrscheinlichkeit | $0.001 \leq p_m \leq 0.01$ |
| Populationsgröße | $30 \leq \mu \leq 500$ |

Tabelle 1: Empfohlene „Standardwerte“ für den GA [42]

4 EVALUATION DER OPTIMIERUNGSROUTINE ANHAND EINES EINFACHEN TESTBAUTEILS

Die Umsetzung der Optimierungsroutine erfolgte durch die objektorientierte Programmiersprache Python. Die Downhill-Simplex-Methode nach Nelder-Mead und der genetische Algorithmus wurden über die Zusatzpakete SCIPY bzw. PYEVOLVE implementiert.

4.1 Definition des Experiments

Die Überprüfung der Wirksamkeit von der Verzugsoptimierung durch grossflächige Wanddickenvariation fand an einer einfachen Winkelgeometrie statt. Diese setzt sich aus neun aneinandergrenzenden Wanddickenabschnitten zusammen (Bild 14).

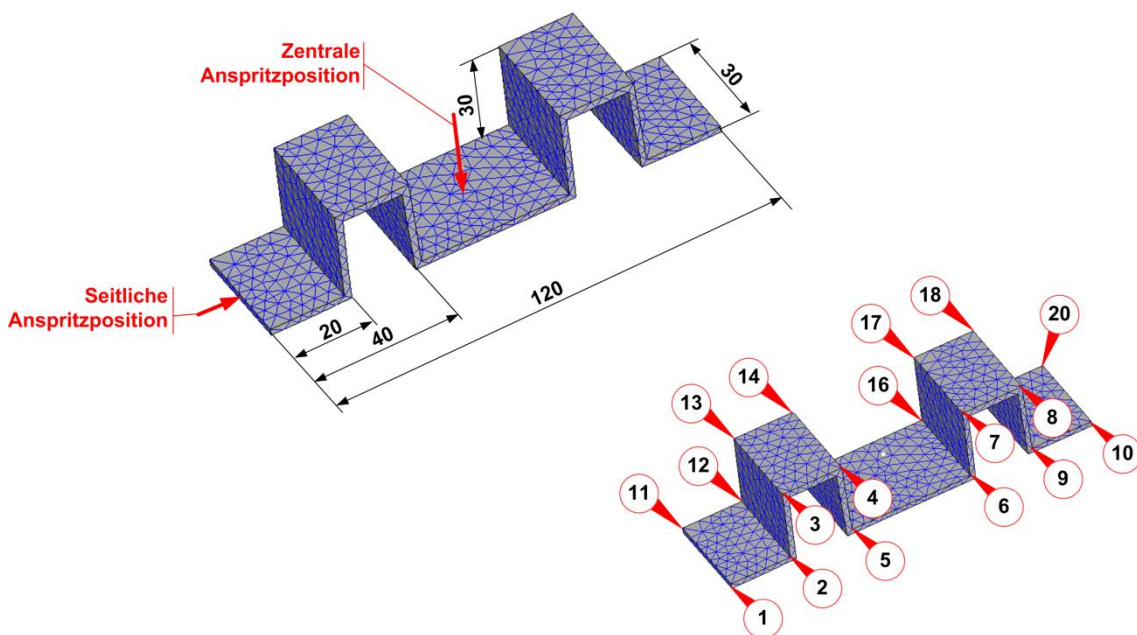


Bild 14: Geometrie zur Überprüfung der Wirksamkeit der Wanddickenvariation für die Verzugsoptimierung.

oben links: Abmasse und Anspritzpositionen
 unten rechts: Positionen für die Verzugsauswertung

Jedem der insgesamt neun Wanddickenabschnitte wird eine biquadratische Verteilungsfunktion (1) zugeordnet und deren Parameter durch die Optimierungsroutine hinsichtlich minimalen Verzugs optimiert. Demzufolge lässt sich die Geometrie als Funktion von insgesamt 54 Parametern auffassen.

Das Wanddickenspektrum wird mit einer Obergrenze von $h_{max} = 2.5 \text{ mm}$ bzw. einer Untergrenze von $h_{min} = 1.5 \text{ mm}$ festgelegt und über die Straffunktionen (16a) bzw. (16b) mit $a = 200$ und einer Gewichtung von $C_{pen} = 1e4$ berücksichtigt. Für die Verzugsbestimmung werden alle Eckpunkte der Geometrie herangezogen. Diese sind in Bild 14 von 1 bis 20 durchnummeriert.

Um den Einfluss der Anspritzlage auf das Optimierungsergebnis zu prüfen, wird neben der zentralen Anspritzposition auch der Fall einer seitlichen Anspritzposition überprüft (Bild 14, links). Die Schmelze wird dabei an einem definierten Knotenpunkt eingeleitet und somit das reale Verhalten eines allfälligen Anschnittes nicht berücksichtigt.

Das in Bild 14 ersichtliche Finite-Elemente-Oberflächennetz wurde mit einer Kantenlänge von 4% der max. Raumdiagonale bewusst grob gehalten, da bei der vorliegenden Untersuchung mehr die Methodik im Vordergrund steht und (noch) nicht die absolute Genauigkeit.

4.1.1 Einstellungen für die Optimierungsalgorithmen

Wie aus Kap. 3 hervorgeht, werden innerhalb der Optimierungsalgorithmen zahlreiche Parameter eingesetzt, die einen Einfluss auf das Optimierungsverhalten aufweisen können. Deren Definition wurde in der vorliegenden Untersuchung möglichst nach den Empfehlungen aus der Literatur vorgenommen.

In Tabelle 2 werden die Einstellparameter für die Downhill-Simplex-Methode (DSM) gezeigt. Der darin enthaltene Startvektor wurde so definiert, dass alle Wanddickenabschnitte zu Beginn eine konstante Wanddicke von 2.0 mm aufweisen.

| Einstellwerte für die Downhill-Simplex-Methode | |
|--|--|
| Reflexionsfaktor | $R = 1.0$ |
| Kontraktionsfaktor | $K = 0.5$ |
| Expansionsfaktor | $E = 2.0$ |
| Schrumpffaktor | $S = 0.5$ |
| Startvektor | $x_1 = [1.414,0,0,1.414,0,0, \dots, 1.414,0,0,1.414,0,0]$ |
| Initialisierungsalgorithmus für den Startsimplex | <ul style="list-style-type: none"> - wenn $x_{1j} \neq 0$ $x_{ij} = 1.25 \cdot x_{1j}$ - wenn $x_{1j} = 0$ $x_{ij} = 0.25$ |

Tabelle 2: Einstellwerte für die Downhill-Simplex-Methode

Die Einstellwerte für den genetischen Algorithmus sind in der Tabelle 3 aufgeführt. Mit einer relativ kleinen Populationsgrösse von $\mu = 8$ wird beabsichtigt, dass im parallelisierten Betrieb alle Individuen gleichzeitig auf den 8 Prozessorkernen berechnet werden können. Um der damit verbundenen Gefahr mit der Auffindung eines lokalen Minimums entgegenzuwirken, wurde die Muta-

tionsrate mit $p_m = 0.05$ (entgegen der Empfehlung in Tabelle 1) leicht erhöht. Durch deren Variation im Bereich $0.01 \leq p_m \leq 0.1$, soll der Einfluss an einer Konfiguration überprüft werden.

| Einstellwerte für den GA | |
|-----------------------------|--------------------------|
| Kreuzungswahrscheinlichkeit | $p_k = 0.9$ |
| Mutationswahrscheinlichkeit | $p_m = 0.05 (0.01, 0.1)$ |
| Populationsgrösse | $\mu = 8$ |
| Anz. Generationen | 250 |

Tabelle 3: Einstellwerte für den GA

Damit der GA nicht bereits bei der Initialisierung mit den stochastisch ermittelten Initialparameter für die Startpopulation negative Wanddicken generiert, werden für alle Parameter P_{ij} der neun Wanddickenabschnitte zusätzliche Grenzwerte vorgegeben. Diese wurden über eine Parameterstudie ermittelt, indem zuerst die Ober- und Untergrenze der Konstanten der biquadratischen Funktion (P_{i1} und P_{i4}) für den Fall, dass die übrigen Parameter identisch Null sind, festgelegt. Anschliessend wurden die Spektren der Parameter für die linearen und quadratischen Terme ($P_{i2}, P_{i3}, P_{i5}, P_{i6}$) durch numerische Auswertungen so definiert, dass nur positive Wanddicken resultieren. Dabei wurde als Randbedingung vorgegeben, dass die Ober- und Untergrenzen der Parameter identisch ausfallen muss. Dies führte schliesslich zu den in der Tabelle 4 ersichtlichen Grenzwerten. Die damit erzielbaren Wanddicken liegen im Bereich zwischen 1.0 mm und 3.24 mm.

| Parametergrenzen für den GA | | | | | |
|-----------------------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|
| P_{i1} | P_{i2} | P_{i3} | P_{i4} | P_{i5} | P_{i6} |
| [1.2 ... 1.6] | [-0.1 ... 0.1] | [-0.1 ... 0.1] | [1.2 ... 1.6] | [-0.1 ... 0.1] | [-0.1 ... 0.1] |

Tabelle 4: Parametergrenzen für den GA

4.1.2 Definition von Prozess und Werkstoff

Aufgrund der umfangreichen Dokumentation der Materialparameter in Cadmould® 3D-F CMV6 und der Relevanz bei Kunststoffbauteilen für Aussenanwendungen, wird für die vorliegende Untersuchung ein ASA Luran S 757R der Fa. BASF verwendet. Dabei handelt es sich um einen besonders witterungsbeständigen amorphen Thermoplasten.

Die Definition der Prozesseinstellungen fand anhand der Geometrie mit einer für alle neun Wanddickenabschnitte konstanten Wanddicke von 2.0 mm statt.

Das Augenmerk wurde auf eine schonende Verarbeitung bei mittleren Werten für die Temperaturen und Drücke (nach den Empfehlungen des Materialherstellers) gelegt. Die Nachdruckzeit wurde durch die Siegelzeit bestimmt und die Restkühlzeit anhand der mittleren Enformungstemperatur definiert. Der Einfachheit halber wird die Werkzeugwandtemperatur als konstant betrachtet. Dies führt schliesslich auf die in der Tabelle 5 ersichtlichen Prozesseinstellungen.

| Prozesseinstellungen | | |
|------------------------|-----|-------|
| Schmelzetemperatur | 260 | [°C] |
| Werkzeugwandtemperatur | 60 | [°C] |
| Füllzeit | 1.0 | [s] |
| Nachdruckzeit | 14 | [s] |
| Restkühlzeit | 6 | [s] |
| Nachdruckhöhe | 500 | [bar] |

Tabelle 5: Prozesseinstellungen für die Evaluation der Optimierungsroutine

Obschon die Variation der Wanddickenverteilung in der Realität eine Änderung der Prozesseinstellungen bewirken kann, wird bei der aktuellen Optimierungsroutine auf eine entsprechende Anpassung verzichtet. Wie später noch gezeigt wird, erweist sich dies als eine hinreichende Annahme.

4.2 Ergebnisse bei zentraler Anspritzposition

Im Folgenden werden nun einige interessante Ergebnisse zusammengetragen. Zuerst wird auf den Vergleich der beiden unterschiedlichen Optimierungsalgorithmen eingegangen und deren Konvergenzverhalten sowie die Güte der Optimierung dargestellt. Anschliessend wird der GA genauer betrachtet und dessen Lösungskonvergenz bei wiederholter Anwendung sowie der Einfluss der Mutationswahrscheinlichkeit auf das Ergebnis dargestellt.

4.2.1 Vergleich der beiden Optimierungsalgorithmen

In Bild 15 ist die Lösungskonvergenz der beiden Optimierungsalgorithmen ersichtlich. Darin ist die Fitness, d.h. der Wert der objektiven Funktion, über der Anzahl Generationen bzw. Iterationen bei der Downhill-Simplex-Methode (DSM) dargestellt. Demgemäss konvergiert der GA deutlich schneller als die DSM. Im parallelisierten Betrieb sind zur Erreichung einer hinreichenden Konvergenz beim GA nur rund 50 Generationen erforderlich, während bei der DSM rund 300 Iterationen ausgeführt werden müssen. Neben dem schlechteren Konvergenzverhalten der DSM, fallen auch die Werte der objektiven Funktion (Fitness) deutlich grösser aus, was einer niedrigeren Lösungsqualität entspricht.

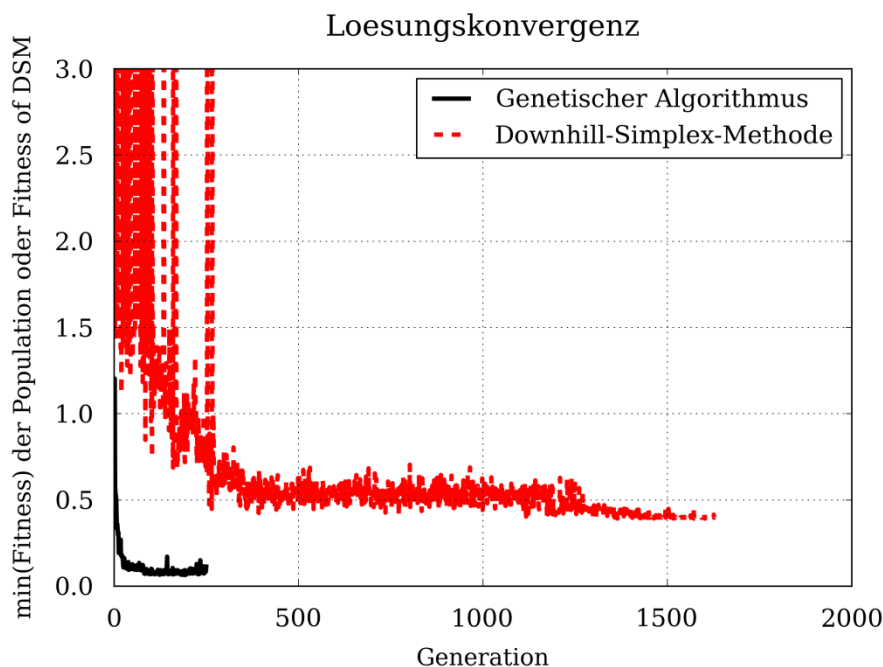


Bild 15: Lösungskonvergenz der unterschiedlichen Optimierungsstrategien

Die Lösungsqualität der beiden Optimierungsalgorithmen wird in Bild 16 gezeigt. Auf der linken Seite wird der Verzug der nach den unterschiedlichen Algorithmen optimierten Wanddickenverteilungen im Vergleich zur Geometrie mit einer konstanten Wanddicke von 2.0 mm (Referenz) dargestellt. Dabei wurde bei allen Geometrien eine Skalierung der Verzugswerte um Faktor 20 vorgenommen. Rechts in Bild 16 sind die (unskalierten) Verzugswerte über die 20 unterschiedlichen Positionen entlang der Bauteilecken (Legende in Bild 16) ersichtlich.

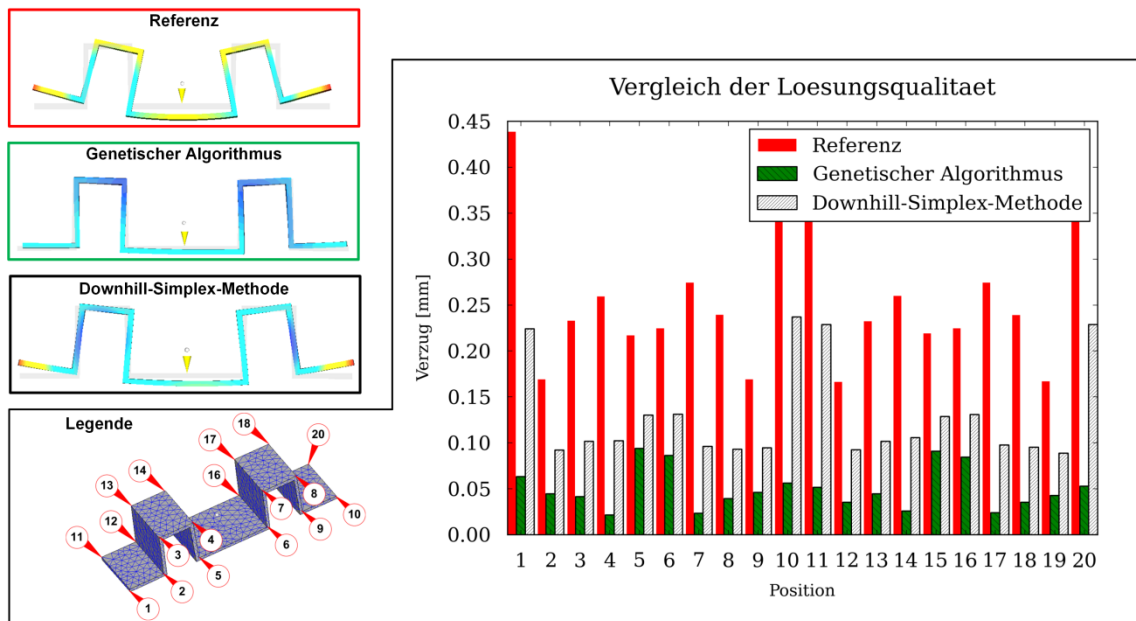


Bild 16: Ergebnisqualität der unterschiedlichen Optimierungsstrategien

links: Globale Darstellung des Formteilverzugs
rechts: Darstellung der lokalen Verzugswerte

Wie sich nun zeigt, lässt sich der Formteilverzug im Vergleich zum Referenzformteil mit konstanter Wanddicke grundsätzlich durch beide Algorithmen deutlich reduzieren. Der GA weist jedoch eine deutlich bessere Lösungsgüte auf und ist in der Lage den Formteilverzug auf wenige hundertstel Millimeter zu reduzieren. Über alle Eckpunkte hinweg betrachtet, lässt sich mit dem GA der Formteilverzug um rund 80% reduzieren, während die DSM eine Verzugsreduktion von rund 50% bewirkt. Ein weiteres positives Ergebnis ist, dass ohne Vorgabe von Symmetriebedingungen in beiden Fällen ein ziemlich symmetrisches Verzugsbild resultiert. Die leichte Asymmetrie lässt sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auf das relativ grobe FE-Netz zurückführen.

Interessant wird nun das Ergebnis für die Wanddickenverteilung des besten Individuums bzw. der Generation mit niedrigstem Funktionswert sein. Dies wird in Bild 17 gezeigt. Im linken Bereich der Abbildung wird die Verteilung der Wanddicke grafisch visualisiert und im nebenstehenden Balkendiagramm die Verteilung der Mittelwerte veranschaulicht.

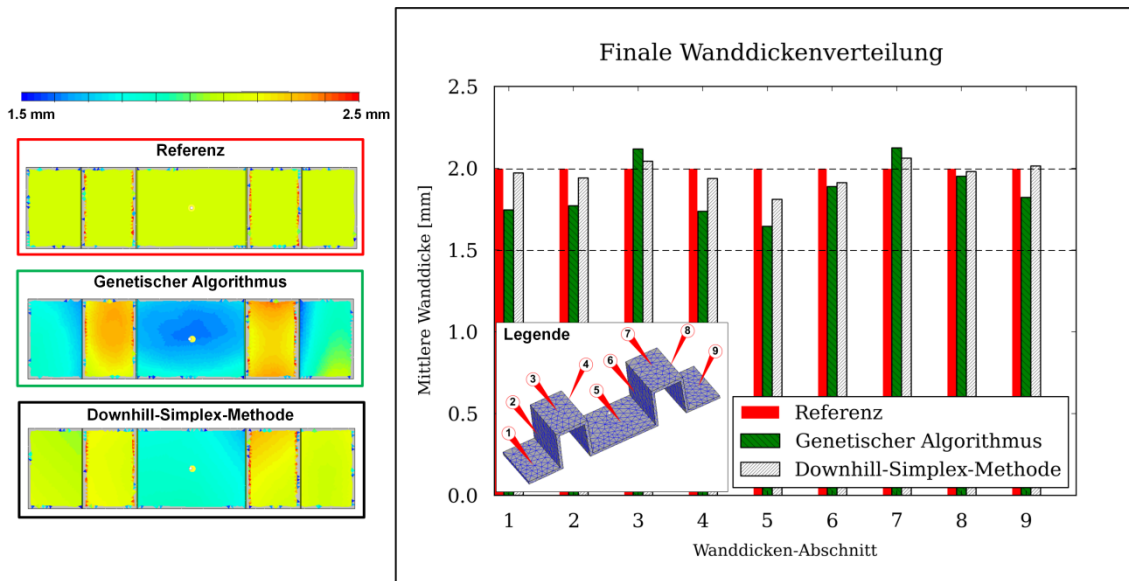


Bild 17: Finale Wanddickenverteilung der unterschiedlichen Optimierungsstrategien

links: Visualisierung der Wanddickenverteilung am Formteil
rechts: Mittelwert der Wanddicke pro Wanddickenabschnitt

Wie aus Bild 17 hervorgeht, führt der GA im Gegensatz zur DSM zu einer deutlich grösseren Variation der Wanddicken. Beiden ist gemein, dass im Bereich der Anspritzung (Bereich 5) eine Ausdünnung eintritt, die bis zu den erhabenen Ebenen (Bereiche 3 bzw. 7) wieder abklingt. Beim GA liegt dort gar eine leichte Erhöhung der Wanddicken vor. Gegen Ende des Fließweges, d.h. in den Bereichen 8 und 9 bzw. 1 und 2 forciert der GA die Ausbildung von geringeren Wanddicken und damit die Verringerung des Schwindungspotentials. Dies lässt sich gut mit der schlechteren Druckübertragung entlang des Fließweges begründen.

Der GA und die DSM forcieren eine möglichst symmetrische Wanddickenverteilung in Bezug auf die Angusslage. Beim GA werden die Möglichkeiten der bi-quadratischen Wanddickenverteilungsfunktionen besser ausgeschöpft, was sich an der Wanddickenänderungen innerhalb eines Wanddickenbereichs erkennen lässt. So zeigt sich beispielsweise bei den Bereichen 1 und 9 eine Ausdünnung der Wanddicke in den Eckpartien oder im Bereich 5 eine zum Anspritzpunkt hin zunehmende Ausdünnung (Bild 17, links). Letzteres widerspricht allerdings den Gestaltungsrichtlinien für Spritzgiessformteile, die zur Vermeidung von Lunkerbildung eine Anspritzung an dickster Stelle vorsehen [45]. Das Resultat der Optimierungsroutine lässt sich möglicherweise dadurch begründen, dass im Anspritzbereich laufend thermische Energie (Schmelze und Dissipation) zugeführt wird und die daraus folgende Verzögerung des Erstarrungsvorgangs durch die Reduktion der Wanddicke kompensiert wird.

4.2.2 Lösungskonvergenz des GA bei wiederholter Anwendung

Wie in Kap. 3.2 beschrieben ist, beginnt der GA mit der stochastischen Initialisierung der Startpopulation. Je nachdem, wie die Startpopulation ausfällt, startet die Lösungssuche an einer anderen Stelle im Parameterraum. Insbesondere bei kleinen Populationen kann es passieren, dass der Algorithmus an unterschiedlichen Stellen im Parameterraum konvergiert (lokales Optimum) und damit unterschiedliche Lösungen zur Folge hat. Um dies zu verhindern, wurde mit $p_m = 0.05$ eine vergleichsweise hohe Mutations-Wahrscheinlichkeit definiert.

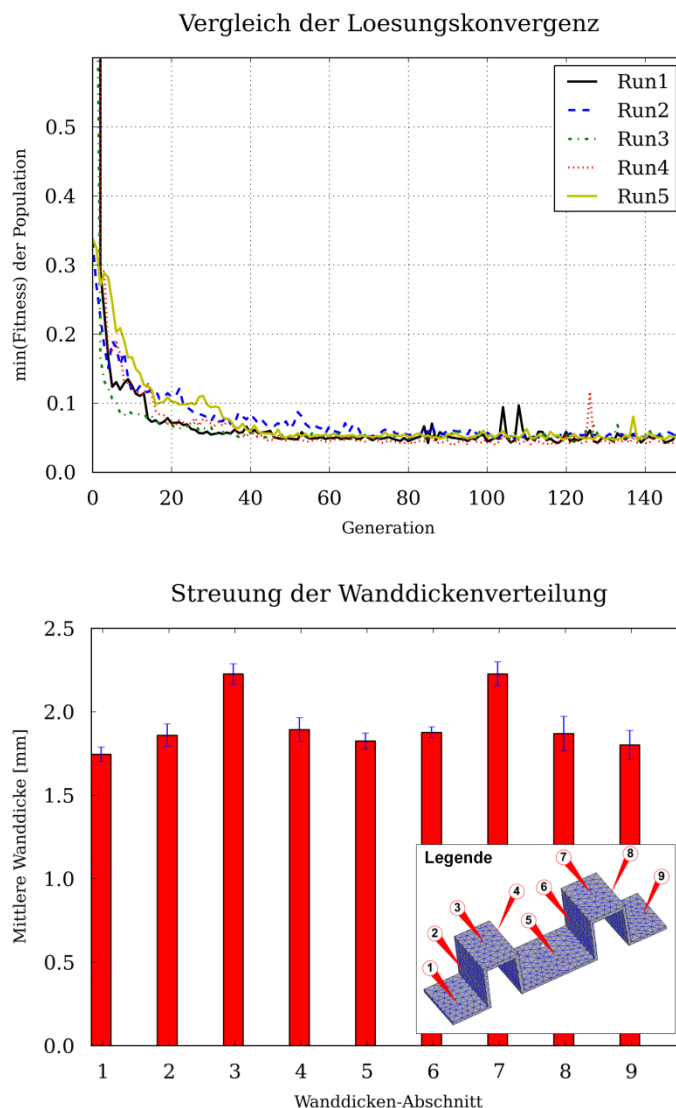


Bild 18: Lösungskonvergenz des besten Individuums bei fünfmaliger Ausführung des GA

oben: Lösungskonvergenz des besten Individuums
 unten: Streuung der mittleren Wanddicke pro Wanddickenabschnitt

Inwiefern diese Massnahme zielführend ist, wurde durch wiederholtes Anwenden des GA überprüft. Das Ergebnis ist in Bild 18 ersichtlich, worin oben die Lösungskonvergenz des besten Individuums und unten die Verteilung der mittleren Wanddicken für jeden der insgesamt neun Wanddickenabschnitte gezeigt werden.

Demnach bleibt die Lösungskonvergenz nahezu unbeeinflusst. Die besten Individuen aller fünf Optimierungen konvergieren nach rund 60 Generationen und erreichen vergleichbare Werte für die objektive Funktion (Fitness) wie auch für die Mittelwerte der Wanddicken in den neun unterschiedlichen Wanddickenabschnitten. Die Zahlenwerte dazu sind in der Tabelle 6 ersichtlich.

| # Run | min(Fitness) | Mittlere Wanddicken innerhalb eines Wanddickenabschnittes [mm] | | | | | | | | |
|-----------|----------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | # 1 | # 2 | # 3 | # 4 | # 5 | # 6 | # 7 | # 8 | # 9 |
| 1 | 0.04247 | 1.70 | 1.87 | 2.29 | 1.88 | 1.88 | 1.88 | 2.22 | 1.93 | 1.70 |
| 2 | 0.04971 | 1.73 | 1.96 | 2.13 | 1.87 | 1.80 | 1.89 | 2.24 | 1.98 | 1.90 |
| 3 | 0.04390 | 1.72 | 1.79 | 2.27 | 2.03 | 1.75 | 1.82 | 2.10 | 1.71 | 1.88 |
| 4 | 0.03882 | 1.83 | 1.78 | 2.18 | 1.83 | 1.86 | 1.93 | 2.33 | 1.78 | 1.69 |
| 5 | 0.04697 | 1.75 | 1.90 | 2.26 | 1.86 | 1.84 | 1.86 | 2.25 | 1.94 | 1.82 |
| MW | 0.04437 | 1.74 | 1.86 | 2.23 | 1.89 | 1.83 | 1.88 | 2.23 | 1.87 | 1.80 |
| Stabw. | 0.00418 | 0.05 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.05 | 0.04 | 0.08 | 0.12 | 0.10 |

Tabelle 6: Objektive Funktion (Fitness) und mittlere Wanddicken der neun unterschiedlichen Wanddickenabschnitte bei wiederholter Anwendung des GA.

Gemäss Tabelle 6 liegen die Standardabweichungen für die unterschiedlichen Wanddickenabschnitte zwischen 0.04 und 0.12 mm. Somit ist der Formteil-Verzug gegenüber der mittleren Wanddicke in den einzelnen Wanddickenabschnitten relativ tolerant und die Fertigung der Formteilkavität muss nicht mit höchster Präzision erfolgen, was wirtschaftliche Vorteile bietet.

4.2.3 Einfluss der Mutationsrate auf die Lösungskonvergenz

Als nächstes wird der Einfluss der Mutationsrate p_m auf die Lösungskonvergenz untersucht. Dazu wurde der GA mit den drei unterschiedlichen Raten $p_m = [0.01, 0.05, 0.1]$ ausgeführt. Die Ergebnisse für die Lösungskonvergenz und die Streuung der mittleren Wanddicken innerhalb der neun Wanddickenabschnitte werden in Bild 19 gezeigt. Darin ist ersichtlich, dass bei der niedrigsten Mutationsrate mehr Generationen erforderlich sind, bis ein optimaler Fitnesswert erreicht wird. Dafür sind die Ausschläge deutlich geringer, was gut nachvollziehbar ist, da nicht ständig neue Lösungsbereiche hinzukommen. Idealerweise würde man somit die Mutationsrate in Funktion der Generation setzen und diese mit fortschreitender Optimierung abklingen lassen.

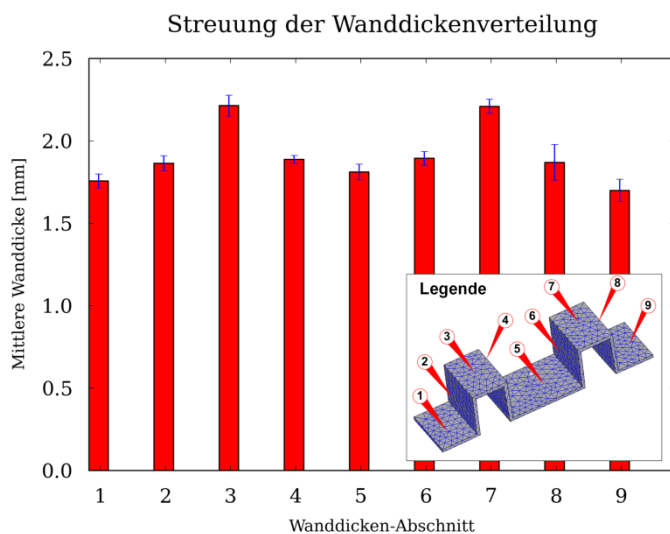
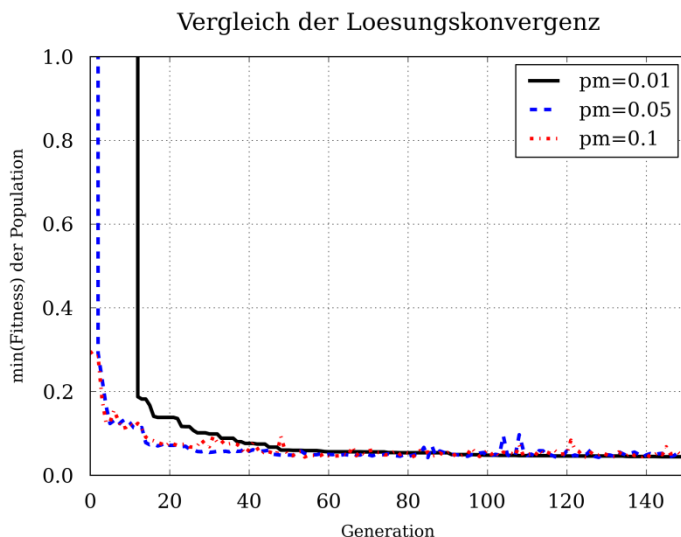


Bild 19: Einfluss unterschiedlicher Mutationsraten auf das Konvergenzverhalten und die Streuung der mittleren Wanddicken in den unterschiedlichen Wanddickenabschnitten

oben: Lösungskonvergenz des besten Individuums
 unten: Streuung der mittleren Wanddicke pro Wanddickenabschnitt

Die Zahlenwerte zu Bild 19 sind in der Tabelle 7 zusammengefasst. Gemäss dieser liegt der Einfluss der Mutationsrate auf die minimale Fitness und die mitt-

leren Wanddicken in den unterschiedlichen Wanddickenabschnitten im Bereich der in Tabelle 6 ersichtlichen Standardabweichungen.

| p_m | min(Fitness) | Mittlere Wanddicken innerhalb eines Wanddickenabschnittes [mm] | | | | | | | | |
|-------|--------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | # 1 | # 2 | # 3 | # 4 | # 5 | # 6 | # 7 | # 8 | # 9 |
| 0.01 | 0.04433 | 1.80 | 1.92 | 2.13 | 1.86 | 1.79 | 1.85 | 2.15 | 1.72 | 1.62 |
| 0.05 | 0.04247 | 1.70 | 1.87 | 2.29 | 1.88 | 1.88 | 1.88 | 2.22 | 1.93 | 1.70 |
| 0.10 | 0.04295 | 1.77 | 1.81 | 2.22 | 1.92 | 1.77 | 1.95 | 2.26 | 1.96 | 1.78 |

Tabelle 7: Einfluss der Mutationsrate p_m auf das beste Individuum und die mittleren Wanddicken in den Wanddickenabschnitten.

4.3 Ergebnisse bei seitlicher Anspritzposition

Im Folgenden werden nun die Ergebnisse bei seitlicher Anspritzposition vorgestellt. Aufgrund der deutlich höheren Ergebnisqualität des GA gegenüber der Downhill-Simplex-Methode, werden nur noch die mit dem GA erzielten Ergebnisse, beginnend mit der Lösungskonvergenz in Bild 20, gezeigt.

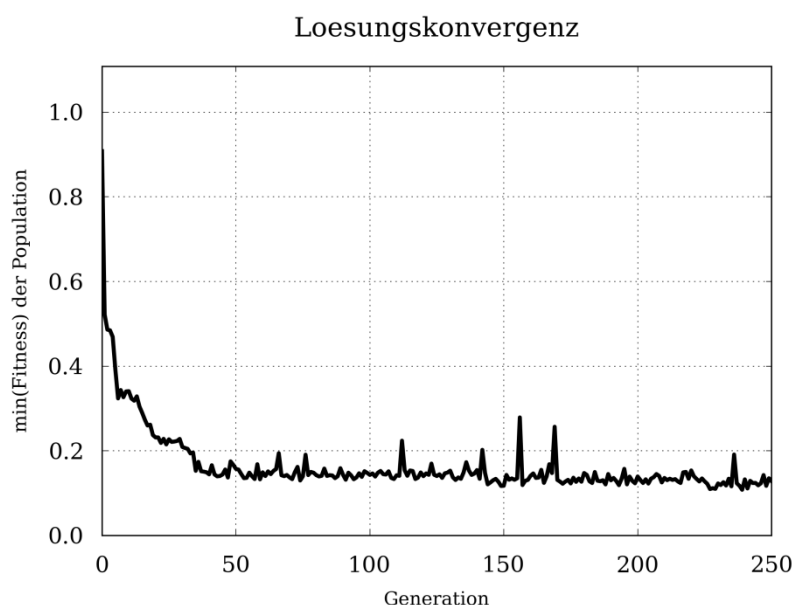


Bild 20: Lösungskonvergenz des GA bei seitlicher Anspritzposition

Dem Verlauf der minimalen Fitness der Population in Bild 20 ist zu entnehmen, dass wiederum ca. 50 Generationen erforderlich sind, um ein optimales Individuum zu erzeugen. Oberhalb von 50 Generationen treten vereinzelt Ausschläge

zu schlechteren Werten auf. Die Ursache dafür liegt in der vergleichsweise hoch gewählten Mutationsrate von $p_m = 0.05$.

Die Ergebnisqualität des besten Individuums ist in Bild 21 ersichtlich. Links oben wird der Verzug mit jeweils 20-facher Verstärkung für das Referenzformteil mit einer konstanten Wanddicke von 2.0 mm und darunter für das Formteil mit optimierter Wanddickenverteilung gezeigt. Während am Referenzformteil im angussfernen Bereich infolge der mit fortschreitendem Fließweg abnehmenden Druckübertrag ein starker Winkelverzug eintritt, führt das nach dem GA optimierte Formteil zu einem deutlich besseren und annähernd symmetrischen Deformationsverhalten.

Dies widerspiegelt sich im Balkendiagramm in Bild 21, worin die an den Positionen 1 bis 20 ermittelten Verzugswerte für die beiden Formteile dargestellt sind. Demgemäss lässt sich mit der optimierten Wanddickenverteilung der Verzug an allen Positionen verringern. Im Mittel beträgt die Reduktion rund 70%, wovon der grösste Anteil im angussfernen Bereich eintritt. Eine vollständige Eliminierung des Formteilverzugs ist mit dem GA auch bei seitlicher Anspritzung nicht zu erreichen.

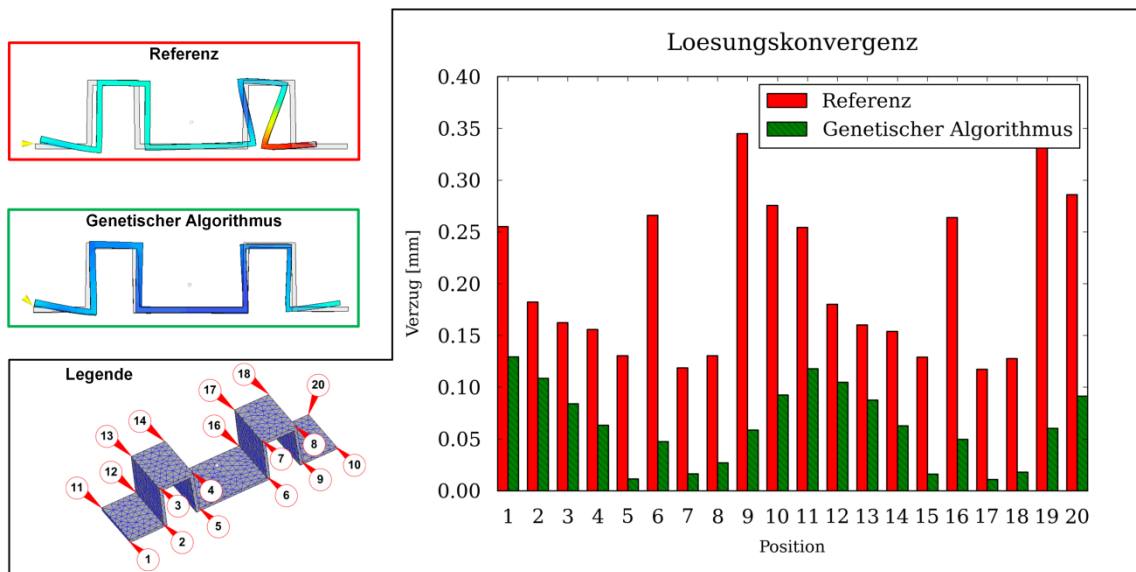


Bild 21: Ergebnisqualität des GA bei seitlichem Anspritzpunkt

links: Globale Darstellung des Formteilverzugs
rechts: Darstellung der lokalen Verzugswerte

Interessant wird nun wieder sein, wie die Wanddickenverteilung am optimierten Formteil ausfällt. Dies ist in Bild 22 dargestellt.

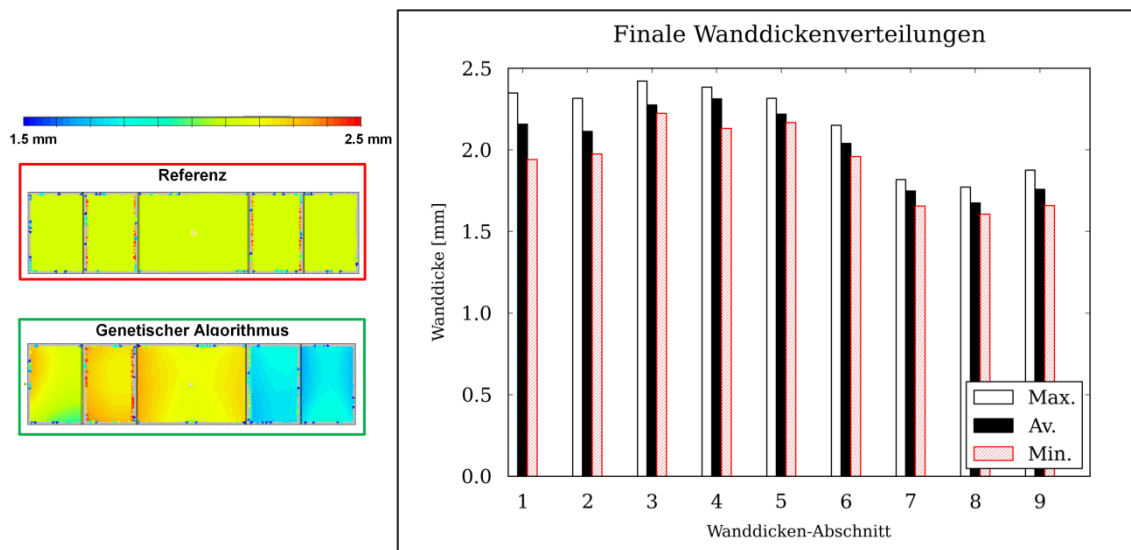


Bild 22: Finale Wanddickenverteilung

links: Visualisierung der Wanddickenverteilung am Formteil
 rechts: Maximal-, Mittel- und Minimalwert der Wanddicke pro Abschnitt

Im linken Bereich von Bild 22 ist die Wanddickenverteilung in den unterschiedlichen Wanddickenabschnitten ersichtlich. Daneben werden die minimalen, mittleren und maximalen Wanddicken für jeden der neun Wanddickenabschnitten mittels Balken dargestellt. Es zeigt sich nun, dass der GA bis zum vierten Wanddickenabschnitt eine kontinuierliche Zunahme der mittleren Wanddicke von 2.15 mm auf 2.35 mm zur Folge hat. Zwischen fünftem und siebtem Abschnitt tritt eine deutliche Reduktion von 2.2 mm auf rund 1.65 mm ein. Ab dem siebten Abschnitt tritt keine wesentliche Änderung der mittleren Wanddicke mehr ein.

Das Bestreben des GA liegt somit darin die Wanddicken in den Bereichen mit tendenziell geringerer Druckübertragung (angussfern) zu reduzieren. Als Konsequenz verringert sich in diesen Bereichen das gesamte Schwindungspotential, was physikalisch sinnvoll scheint.

4.4 Anmerkungen zum Rechenaufwand

Die Optimierungen fanden auf handelsüblichen Windows-Rechnern mit der Intel-i7-Prozessortechnologie statt. Je nach Prozessortyp (E3770/E5520) und Speicherarchitektur (SSD/SATA) dauerte bei den relativ groben FE-Netzen der Durchlauf einer Optimierungsiteration zwischen einer und zwei Minuten.

Bei parallelisiertem GA mit einer Population von acht Individuen dauert demnach die Berechnung einer Population zwischen einer und zwei Minuten. Folglich beträgt die Rechendauer bis zur Erreichung einer hinreichenden Lösungskonvergenz mit 50 Generationen (Bild 15) zwischen 50 und 100 Minuten.

Bei der Downhill-Simplex-Methode ist der Rechenaufwand ungemein höher, da keine Parallelisierung vorgenommen werden kann. Bis zum Eintreten einer akzeptablen Lösungskonvergenz sind gemäss Bild 15 rund 1'500 Generationen erforderlich, was einen Rechenaufwand von 25h bzw. 50h erforderlich machte.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Aus der vorliegenden Untersuchung am Beispiel einer vergleichsweise einfachen Geometrie geht hervor, dass der Formteilverzug durch grossflächige Variation der Wanddicken über einen Masterelementansatz mit der abschnittswiseen Definition biquadratischer Funktionen im Vergleich zu einem Formteil mit konstanter Wanddicke stark reduziert werden kann, was sich gut mit den Untersuchungen von Lee und Kim [24, 25] deckt.

Die Optimierung der Geometrie, bestehend aus insgesamt 54 Funktionsparametern, gelingt mit dem genetischen Algorithmus im Vergleich zur Downhill-Simplex-Methode mit deutlich besserer Lösungsqualität und –konvergenz. Wegen der fehlenden Parallelisierung ist bei der Downhill-Simplex-Methode zudem die Rechendauer um mehr als Faktor zehn grösser. Dies stellt im Vergleich zu den Untersuchungen von Lee und Kim [24, 25], bei der einzig die Downhill-Simplex-Methode eingesetzt wurde, eine bedeutende Erkenntnis dar.

Die mit dem genetischen Algorithmus an einer einfachen, symmetrisch aufgebauten Geometrie, aus einer Abfolge von neun aneinandergrenzenden Wanddickenabschnitten, für den Werkstoff ASA Luran S erzielte mittlere Reduktion des Formteilverzugs liegt je nach Anspritzlage zwischen 70 und 80 Prozent. Eine vollständige Eliminierung ist somit nicht möglich, wobei sich dies teils auch auf die vorgenommene Verzugsdefinition (Soll-Geometrie mit isotropem Schwindungsverhalten) zurückführen lässt.

Der genetische Algorithmus führt sowohl bei zentraler als auch bei seitlicher Anspritzung zu interessanten und physikalisch begründbaren Ergebnissen für die finale Wanddickenverteilung. Ohne Vorgabe von Symmetriebedingungen resultiert bei zentraler Anspritzung eine ziemlich symmetrische Wanddickenverteilung. Bei beiden Anspritzvarianten tritt ab einer bestimmten Fliessweglänge eine deutliche Reduktion der Wanddicke ein. Somit scheint der Algorithmus in Bereichen schlechter Druckübertragung das Schwindungspotential durch Verringerung der Wanddicke zu reduzieren.

Durch mehrmalige Anwendung des genetischen Algorithmus konnte gezeigt werden, dass trotz Verwendung einer vergleichsweise geringen Populationsgrösse, Ergebnisse mit vergleichbarer Wanddickenverteilung resultieren, was die Wahrscheinlichkeit für das jeweilige Auffinden eines globalen Optimums erhöht und die Optimierung auf einem heute zum PC-Standard zählenden Intel-Prozessor mit acht Rechenkernen ermöglicht.

Die singuläre Rechenzeit für die Berechnung eines einzelnen Individuums lag beim vorgestellten Beispiel im Bereich von 1-2 Minuten. Für komplexere Geometrien und höhere Auflösungen des FE-Netzes werden diese Rechenzeiten nicht mehr ausreichen und realistischerweise zwischen 10 bis 30 Minuten betragen. Im parallelisierten Betrieb, d.h. die einzelnen Individuen werden parallel berechnet, würde dies Rechenzeiten von einem bis zwei Tage verursachen, bis eine optimale Wanddickenverteilung vorliegt. In Anbetracht der komplexen Zusammenhänge bei der Verzugsoptimierung, sollte dieser Rechenaufwand vertretbar sein.

Die im Rahmen der vorliegenden Studie vorgestellte Optimierungsroutine führt nur dann zu brauchbaren Ergebnissen, wenn die Verzugsberechnung mit entsprechender Genauigkeit erfolgt. Stimmt die Verzugsberechnung nur qualitativ, dann zeigt die Optimierung zumindest die Tendenz für die optimale Wanddickenverteilung auf. Aktuelle Forschungsarbeiten [4, 5] legen aber die Vermutung nahe, dass die Verzugsberechnung in naher Zukunft auch für die Kunststoffe mit komplexer Morphologie, d.h. für teilkristalline und faserverstärkte Thermoplaste, mit hinreichender Genauigkeit gelingt.

Aus diesen Gründen ist eine Weiterverfolgung der vorgeschlagenen Methode zur Verzugsoptimierung lohnenswert.

An der in der vorliegenden Machbarkeitsstudie verwendeten Versuchsgeometrie sind folgende weitere Arbeiten geplant:

- Anwendung der Optimierungsroutine an Kunststoffen mit höherem Schwindungspotential (teilkristalline Thermoplaste)
- Quantifizierung der Genauigkeit der Verzugsberechnung für ausgewählte amorphe und teilkristalline Thermoplaste (Vergleich zwischen digitalisiertem realen Formteil und der Spritzgussimulation)
- Ggf. Verbesserung der Spannungsberechnungen durch Einbezug von viskoelastischen Materialmodellen.
- Umsetzung der optimierten Geometrie im Spritzgiesswerkzeug für ein Material mit ausreichender Ergebnisqualität

Weiterhin steht die Weiterentwicklung der Routine hinsichtlich Praktikabilität im Vordergrund. Dazu sind folgende Arbeiten geplant:

- Erweiterung der Methode für die Wanddickenvariation, damit diese bei beliebigen, d.h. auch bei komplexen 3D-Geometrien angewendet werden kann und auch Oberflächenelemente wie Radien berücksichtigen kann.
- Einbezug der fertigungsgerechten Gestaltung durch Berücksichtigung allfälliger Hinterschnitte

- Einbezug der Prozessparameteranpassung (Nachdruck- und Kühlzeit) bei einflussreichen Änderungen der Wanddicke
- Einbezug des Anschnittes und dessen geometrische Anpassung an die lokale Wanddicke

In Hinblick der zunehmenden Bedeutung ressourcenschonender Herstellung wäre es eine logische Konsequenz die Zykluszeit bzw. den Werkstoffaufwand als weitere Optimierungsgrösse in den Algorithmus einfliessen zu lassen, um dadurch eine möglichst verzugsfreie Geometrie bei minimalem Werkstoff- und Produktionsaufwand generieren zu können.

Danksagung

Für die kostenlose Nutzung des Cadmould® 3D-F CMV6 bedanken sich die Autoren bei der Simcon kunststoff-technischen Software GmbH.

6 ANHANG

Anbei werden der Vollständigkeit halber noch die in der Simulation mit Cad-mould® 3D-F CMV6 verwendeten Materialdaten für ASA Luran S 757R aufgeführt.

a) Viskositätsmodell nach Carreau mit der Zeit-Temperaturverschiebung nach WLF:

$$\eta = \frac{P_1 \cdot a_T}{(1 + \dot{\gamma} \cdot P_2 \cdot a_T)^{P_3}} \quad \log_{10}(a_T) = \frac{8.86 \cdot (T_0 - T_S)}{101.6 + (T_0 - T_S)} - \frac{8.86 \cdot (T - T_S - f_p \cdot p)}{101.6 + (T - T_S)}$$

| Parameter | Wert | Einheit |
|-----------|---------|---------|
| P_1 | 7040.73 | [Pas] |
| P_2 | 0.2001 | [s] |
| P_3 | 0.7078 | [-] |
| T_0 | 240.0 | [°C] |
| T_S | 114.92 | [°C] |
| f_p | 0.0 | [1/bar] |

b) pvT-Modell nach IKV

Schmelzebereich: $v(T, p) = \frac{P_{S1}}{P_{S4} + p} + \frac{P_{S2}}{P_{S3} + p} \cdot T$

Feststoffbereich: $v(T, p) = \frac{P_{F1}}{P_{F4} + p} + \frac{P_{F2}}{P_{F3} + p} \cdot T$

Übergangstemperatur: $T_{trans}(p) = P_{T1} + P_{T2} \cdot p$

| Parameter | Wert | Einheit |
|-----------|---------|--------------------------|
| P_{S1} | 46850.8 | [bar/cm ³ g] |
| P_{S2} | 1.3823 | [bar/cm ³ gK] |
| P_{S3} | 1947.49 | [bar] |
| P_{S4} | 55768.4 | [bar] |
| P_{F1} | 55600 | [bar/cm ³ g] |
| P_{F2} | 0.4121 | [bar/cm ³ gK] |
| P_{F3} | 1315.76 | [bar] |
| P_{F4} | 62560.4 | [bar] |
| P_{T1} | 122.65 | [°C] |
| P_{T2} | 0.0489 | [1/bar] |

c) E-Modul in Funktion der Temperatur

$$E(T) = E_0 + E_1 \cdot T + E_2 \cdot T^2 + E_3 \cdot T^3$$

| Parameter | Wert | Einheit |
|-----------|---------|------------------------|
| E_0 | 3065.46 | [MPa] |
| E_1 | -29.534 | [MPa/°C] |
| E_2 | 0.451 | [MPa/°C ²] |
| E_3 | -0.0029 | [MPa/°C ³] |

d) Weitere Stoffdaten (druck- und temperaturunabhängig)

| Bezeichnung | Symbol | Wert | Einheit |
|----------------------|-----------|------|---------|
| Poissonzahl | μ | 0.35 | [-] |
| Wärmeleitfähigkeit | λ | 0.11 | [W/mK] |
| Spez. Wärmekapazität | c_p | 2100 | [J/kgK] |

Literatur

- [1] Albers, A.; Nowicki, L. Integration der Simulation in die Produktentwicklung Symposium, Bremen, 2003
- [2] Kennedy, P. K.; Practical and scientific aspects of injection moulding simulation
Dissertation an der technischen Universität Eindhoven, 2008
- [3] Michaeli, W.; Baranowski, T. Simulation of the microstructure formation in injection molded semi-crystalline thermoplastic parts
Journal of Polymer Engineering 30 (2010), S. 29-43
- [4] Möbius, T.; Eilbracht, S.; Rudolph, N.; Osswald, T. A. Analyse zur Faserorientierung und Faser-Matrix-Separation bei einem Pressprozess mit kreisförmiger Fließfront
Zeitschrift Kunststofftechnik 9 (2013) 2; S. 101-128
- [5] Micheali, W.; Niggemeier, P. Schwindung und Verzug besser simulieren
Kunststoffe 89 (1999) 6; S. 70-74
- [6] Wilkinson, R.; Poppe E.A.; Leidig, K.; Schirmer, K. Engineering polymers: the 'top ten' injection moulding problems
Firmenschrift der Du Pont de Nemours GmbH, Bad Homburg, 2007
- [7] Yin, F.; Mao, H.; Hua, L.; Guo, W.; Shu, M. Back propagation neural network modeling for warpage prediction and optimization of plastic products during injection moulding
Materials and Design 32 (2011), S. 1844-1850
- [8] Shi, H.Z.; Gao, Y.H.; Wang, X.C. Optimization of injection molding process parameters using integrated artificial neural network model and expected improvement function method
Int. J. Adv. Manuf. Technol. 48 (2010), S. 955-962
- [9] Deng, Y.M.; Zhang, Y.; Lam, Y.C. A hybrid of mode-pursuing sampling method and genetic algorithm for minimization of injection moulding warpage
Materials and Design 31 (2010), S. 2118-2123
- [10] Farshi, B.; Gheshmi, S.; Miandoabchi, E. Optimization of injection molding process parameters using sequential simplex algorithm.
Materials and Design 31 (2010), S. 414-423

- [11] Kurtaran, H.; Ozcelik, B.; Erzurumlu, T. Warpage optimization of a bus ceiling lamp base using neural network model and genetic algorithm. J. Mater. Process. Technol. 205 (2005), S. 314-319
- [12] Ozcelik, B.; Sonat, I. Warpage and structural analysis of thin shell plastic in the plastic injection molding. Material and Design 30 (2009), S. 367-375
- [13] Huang, M.C.; Tai, C.C. The effective factors in the warpage problem of an injection molded part with a thin shell feature. J. Mater. Process. Technol. 201 (2001), S. 1-9
- [14] Kong, W.Y.; Kim, J.K. Warpage in plastic packages: effects of process conditions geometry and materials. Trans. Compon. Packag. Manufact. 26 (2003), S. 2345-2352
- [15] Erzurumlu, T.; Ozcelik, B. Minimization of warpage and sink index in injection molded thermoplastic parts using Taguchi optimization method. Material and Design 27 (2006), S. 853-861
- [16] Wang, G.L.; Zhao, G.Q.; Li, H.P.; Guan, Y.J. Influence factor analysis of warpage and optimization of process parameters in plastic injection molding of thin-wall plastic parts based on Taguchi optimization method. China. Mech. Eng. 20 (2009), S. 488-492
- [17] Gao, Y.H.; Wang, X.C. An effective warpage optimization method in injection molding based on the Kriging model. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 37 (2008), S. 953-960
- [18] Ming, Z.; Ying, X. A study of gate location optimization of plastic injection molding using sequential linear programming. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 49 (2010), S. 97-103
- [19] Pandelidis, I.; Zhou, Q. Optimization of injection molding design. Part I: gate location optimization. Polym. Eng. Sci. 30 (1990), S. 873-882
- [20] Zhai, M.; Shen, C.Y. An optimization scheme based on flow resistance to locate optimum gate of complex part. J. Reinf. Plast. Compos 24 (2005), S. 1559-1566

- [21] Zhai, M.; Lam, Y.C.; Au, C.K.; Liu, D.S. Automated selection of gate location for plastic injection molding processing. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 44 (2005), S. 229–242
- [22] Lam, Y.C.; Jin, S. Optimization of gate location for plastic injection moulding. *J. Inj. Molding Technol.* 5 (2001), S. 180-192
- [23] Lam, Y.C.; Britton, G.A.; Liu, D.S. Optimization of gate location with design constraints. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 24 (2004), S. 560-566
- [24] Lee, B.H.; Kim, B.H. Optimization of part wall thicknesses to reduce warpage of injection-molded parts based on the modified complex method. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 34 (1995), S. 793-811
- [25] Lee, B.H.; Kim, B.H. Variation of part wall thicknesses to reduce warpage of injection molded part - robust design against process variability. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 36 (1997), S. 791-807
- [26] Stitz, S.; Keller, W. Spritzgiesstechnik, Verarbeitung-Maschine-Peripherie. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2001
- [27] Delaunay, B. Sur la sphère vide. *Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk*, 7 (1934), S. 793-800
- [28] Hieber, C.A.; Shen, S.F. A finite-element/finite-difference simulation of the injection moulding filling process. *J. Non-Newt. Fluid. Mech.* 7 (1980), S. 1-32
- [29] Simcon GmbH. Simulation einer Flüssigkeitsströmung und Struktur-analyse in dünnwandigen Geometrien. Patentschrift, DE 602 14 696 T2 (2007)
- [30] Hele-Shaw, H.S. The motion of a perfect liquid. *Proc. Royal Inst.* 49 (1899)
- [31] Cao, W.; Wang, R.; Shen, C. A dual domain method for 3D flow simulation. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 43 (2004), S. 1471-1486

- [32] Blum, R. Verbesserte Temperaturkontrolle beim Spritzgießen
Dissertation am Institut für Kunststoffverarbeitung,
RWTH Aachen, 1996
- [33] Menges, G. Werkstoffkunde Kunststoffe
Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1990
- [34] Besl, P.J.;
McKay, H.-D. A method for registration of 3-D shapes
IEEE transactions on pattern analysis and machine
intelligence, 14 (1992), S. 239-256
- [35] Davis, L. The handbook of genetic algorithms
Van Nostrand Reingold, New York, 1991
- [36] Goldberg, D. Genetic algorithms in search, optimization and ma-
chine learning
Addison-Wesley, Massachusetts, 1989
- [37] Holland, J. Adaption in natural and artificial systems
The University of Michigan press, Ann Arbor, 1975
- [38] Michalewicz, Z. Genetic algorithms + data structures = evolution pro-
grams
AI Series, Springer-Verlag, New York, 1994
- [39] Weicker, K. Evolutionäre Algorithmen
Teubner Verlag, Wiesbaden, 2007
- [40] Nelder, J.A.;
Mead, R. A Simplex Method for Function Minimization
Computer Journal, 7 (1965), S. 308-313
- [41] Filho, R.J.L.;
Treleven, P.C.;
Alippi, C. Genetic-Algorithm programming environments
Computer, 27 (1994), S. 28-43
- [42] Nissen, V. Einführung in Evolutionäre Algorithmen
Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 1997
- [43] Goldberg, D.E.;
Kalyanmoy, D. A comparative analysis of selection schemes used in
genetic algorithms
Foundations of Genetic Algorithms, Morgan Kauf-
mann, California, 1991
- [44] Sivaraj, R.;
Ravichandran, T. A review of selection methods in genetic algorithms
Int. Jour. of Eng. Sc. and Tech. 3 (2011), S. 3792-
3797

- [45] Erhard, G. Konstruieren mit Kunststoffen
Carl Hanser Verlag, München, 2008

Stichworte:

Optimierung von Schwindung und Verzug, Spritzgiessen, Wanddickenvariation, Evolutionäre Algorithmen

Keywords:

Optimization of part warpage, injection moulding, wall thickness optimization, evolutionary algorithm

Autor/author:

MSc ME ETH Mario Studer
Prof. Dr. –Ing. Frank Ehrig
Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung
Hochschule für Technik Rapperswil
Oberseestrasse 10
CH-8640 Rapperswil

E-Mail-Adresse: mstuder@hsr.de
Webseite: www.iwk.hsr.ch
Tel.: +41(0)55/222-4863
Fax: +41(0)55/222-4769

Bitte langfristig erreichbaren Kontakt einsetzen!

Herausgeber/Editor:

Europa/Europe
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Ehrenstein, verantwortlich
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen
Deutschland
Phone: +49/(0)9131/85 - 29703
Fax.: +49/(0)9131/85 - 29709
E-Mail-Adresse: ehrenstein@lkt.uni-erlangen.de

Amerika/The Americas
Prof. Prof. h.c Dr. Tim A. Osswald,
responsible
Polymer Engineering Center, Director
University of Wisconsin-Madison
1513 University Avenue
Madison, WI 53706
USA
Phone: +1/608 263 9538
Fax.: +1/608 265 2316
E-Mail-Adresse: osswald@engr.wisc.edu

Verlag/Publisher:

Carl-Hanser-Verlag
Jürgen Harth
Ltg. Online-Services & E-Commerce,
Fachbuchanzeigen und Elektronische Lizenzen
Kolbergerstrasse 22
81679 Muenchen
Tel.: 089/99 830 - 300
Fax: 089/99 830 - 156
E-mail-Adresse: harth@hanser.de

Beirat/Editorial Board:

Professoren des Wissenschaftlichen
Arbeitskreises Kunststofftechnik/
Professors of the Scientific Alliance
of Polymer Technology