

Entwicklung eines Konzeptes zur Einbindung von Simulationsergebnissen in einen evolutionären Algorithmus zur Generierung von Kühlkanälen in Spritzgießwerkzeugen

Seminararbeit
von
Kai Meschede

Betreuer: Dipl.Wirt.-Ing. Philipp Nikoleizig

RHEINISCH-WESTFÄLISCHE
TECHNISCHE HOCHSCHULE
AACHEN



INSTITUT FÜR KUNSTSTOFFVERARBEITUNG AACHEN

Aachen, September 2014

1	EINLEITUNG	1
2	FUNKTIONSWEISE DER SOFTWARE.....	2
2.1	Geometrische Bewertungsfunktion.....	3
3	THERMISCHE BEWERTUNGSFUNKTION.....	4
3.1	Multiple Regression.....	4
3.2	Aufbau der 2D-Simulationsumgebung	4
3.2.1	Modellbildung und Diskretisierung	5
3.2.2	Modellierung des Spritzgießprozesses.....	6
3.3	Aussehen der Datenbank	6
4	IMPLEMENTIERUNG DER THERMISCHEN BEWERTUNGSFUNKTION IN DIE SOFTWARE... 	7
4.1	Aufteilen des Raumes in 2D-Schnittflächen	8
4.2	Bestimmen der nötigen Parameter des Abschnittes	8
4.3	Anfrage an Datenbank mit den Parametern	9
4.4	Regressionskoeffizienten und Temperatur erhalten	10
4.5	Interpolation auf die übrigen Punkte	10
4.6	Bewertung der Temperaturverteilung.....	11
5	FAZIT & AUSBLICK.....	11
6	LITERATUR.....	12

1 EINLEITUNG

Die Balance zwischen Wirtschaftlichkeit und Qualität bei der Fertigung von Kunststoffbauteilen bildet einen Interessenskonflikt speziell für die Konstruktion von Spritzgießwerkzeugen [MMM07, Zöl99]. Dieser Konflikt besteht darin, die Qualitätsanforderungen der Bauteile zu erfüllen und gleichzeitig die benötigte Zeit für den Spritzgießvorgang (Zykluszeit) so gering wie möglich zu halten. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Entwicklung eines optimalen Verlaufes von Kühlkanälen, da diese für die Wärmeabfuhr innerhalb des Werkzeuges verantwortlich sind. Die Planung des Verlaufes erfolgt in der Regel mit Hilfe von Simulationssoftware, welche Probleme der Wärmeabfuhr bereits vor realen Versuchen aufzeigen kann. Bis zu einem optimalen Kühlkanalverlauf werden mehrere dieser zeitaufwendigen Simulationen und Anpassungen benötigt bis alle Anforderungen hinreichend erfüllt sind. Zu den Anforderungen gehören, außer den beiden oben genannten, beispielsweise noch Minimierung von Schwindung und Verzug sowie die Vermeidung von Hot-Spots [Koc02, Zöl99]. Diese Anpassungen beruhen auf Grundlage von Erfahrungswissen und müssen bislang durch menschliche Interaktion erfolgen. Eine weitestgehende Automatisierung könnte dabei von großem wirtschaftlichem Nutzen sein und wurde bereits genauer untersucht

[FKN11a, FKN11b, MES13, MMBS04, MMLB07, MWM02,].

Seit den 60er Jahren werden für komplexe Problemstellungen mit vielen Einflussgrößen, für deren Lösung bekannte native iterative Lösungsverfahren zu aufwendig sind, verstärkt neue Ansätze entwickelt. Hierzu gehören evolutionäre Algorithmen [Kit11, MMBH04]. Dabei werden am Anfang Ausgangsobjekte (Eltern) erstellt, welche während eines Iterationsschritts geändert (mutiert) werden. Diese veränderten Objekte (Kinder) werden anschließend bewertet. Das jeweils am besten bewertete Kind eines jeden Elter wird dann als neues Elter übernommen (Selektion), wodurch eine Optimierung stattfindet. Mittels eines Grenzkriteriums (Abbruchkriterium) wird untersucht, ob eines der Eltern eine akzeptable Güte aufweist oder eine weitere Iteration notwendig ist. Sollte dieses Kriterium erfüllt sein, ist die Optimierung erfolgreich abgeschlossen, ansonsten wird die Iteration wiederholt [Nis97, Wei07].

Ziel dieser Seminararbeit ist es ein Konzept für eine weitere Bewertungsfunktion eines evolutionären Algorithmus zu entwickeln und die Implementierung zu beschreiben. Hierfür wird als Grundlage eine Software genutzt, welche einen Kühlkanalverlauf in einem Spritzgießwerkzeug anhand einer einfachen geometrischen Bewertungsfunktion optimiert. Durch den neuen Ansatz soll es möglich sein, eine thermische Aussage und somit auch eine erste thermische Bewertung des Formteils zu erzielen.

2 FUNKTIONSWEISE DER SOFTWARE

Die bereits erstellte Software nutzt einen evolutionären Ansatz, um eine möglichst optimale Kühlkanalauslegung zu erreichen. Das Ablaufdiagramm ist in Bild 1 zu sehen.

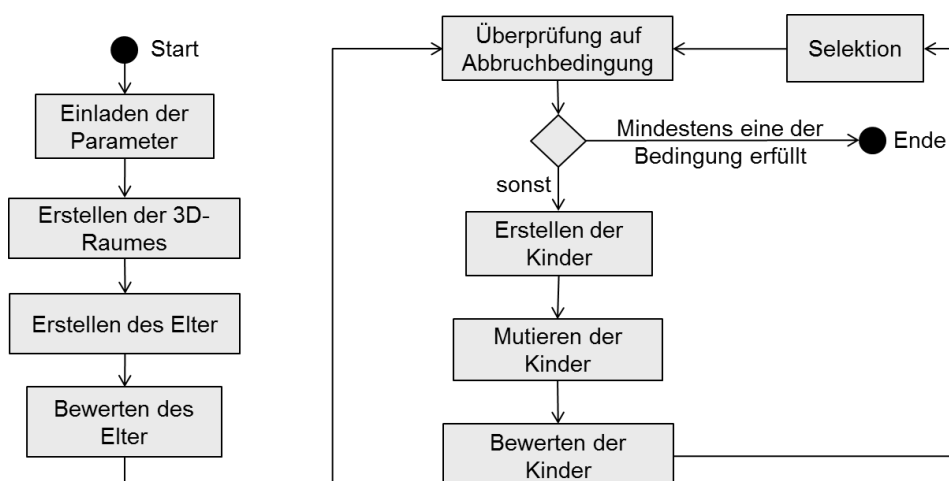


Bild 1: Ablaufdiagramm der bereits erstellten Software

Nach dem Einladen der Parameter wird ein 3D-Raum erstellt, welcher die wichtigsten Komponenten eines Spritzgießwerkzeuges enthält. In diesen werden, in einem festgelegten Abstand zum Formteil, Eckpunkte eines initialen Kühlkanals definiert und anschließend

mäanderförmig verbunden. Dadurch entsteht ein erster einfacher Kühlkanalverlauf (Elter). Ein beispielhafter initialer Kühlkanalverlauf und dessen optimierter Verlauf mittels des Algorithmus sind in Bild 2 zu sehen. Da der Kühlkanalverlauf als Optimierungsparameter dient, wird in jeder Iteration des Algorithmus der Kühlkanalverlauf unter der Einbeziehung entsprechender Grenzen mutiert und somit verändert (Kind). Damit eine Güte für den Kanalverlauf bestimmt werden kann wird aktuell eine geometrische Bewertungsfunktion genutzt, welche im nächsten Abschnitt genauer beschrieben wird. Falls die Güte eines Kühlkanalverlaufes über einen festgelegten Grenzwert liegt oder die maximale Anzahl an Iterationen erreicht ist, wird der Algorithmus beendet und die Ergebnisse exportiert. Diese können dann mit Hilfe von Visualisierungssoftware geöffnet und betrachtet werden.

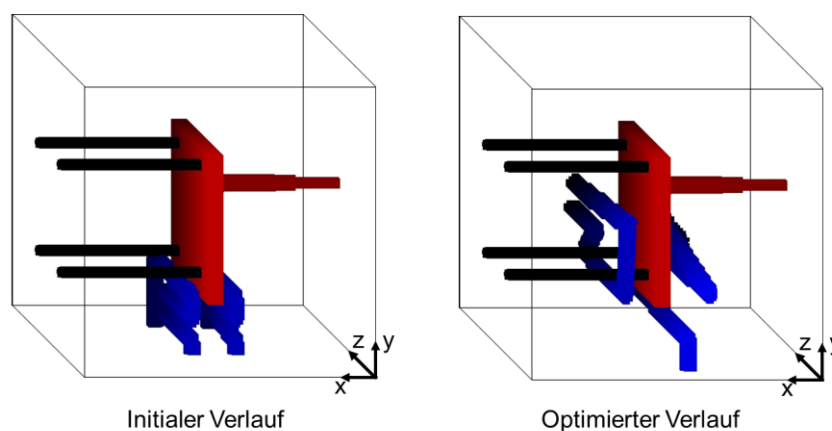


Bild 2: Optimierung des Kühlkanalverlaufes für ein plattenförmiges Formteil

2.1 Geometrische Bewertungsfunktion

Die geometrische Bewertungsfunktion bewertet zum einen, über einen einfachen kreisförmigen Einflussbereich, das Potential der Wärmeabfuhr eines Kühlkanalverlaufes und zum anderen die geometrischen Interaktionen zwischen Kühlkanälen und anderen Komponenten des Werkzeuges. Dabei wird geprüft, dass sich Kühlkanäle und Komponenten des Werkzeuges nicht zu nahe sind oder sogar schneiden und der Abstand zum Bauteil möglichst flächendeckend ist. Dazu wird der Kühlkanalverlauf in einzelne infinitesimale Zylinder unterteilt und deren Umgebung untersucht. Es werden zusätzlich zwei Zylinder mit unterschiedlichem Radius um jeden infinitesimalen Zylinder gelegt und die Umgebung dadurch in unterschiedliche Bereiche aufgeteilt. Der erste vergrößert den Bereich des Kühlkanals um einen Sicherheitsabstand und der zweite vergrößert diesen um einen Einflussbereich, in welchem der Kanal eine bemerkbare Wärmeaufnahme zu einem bestimmten Zeitpunkt hat. Je nachdem, ob Interaktionen in der Umgebung gewollt sind, wird eine gute oder schlechte Bewertung gegeben und die Güte somit verändert. Die Interaktion von Sicherheitsbereich oder Kühlkanal mit anderen Kühlkanälen oder Geometrien wird negativ bewertet. Positiv bewertet wird nur die Interaktion des Einflussbereiches mit der

Oberfläche des Formteiles. Alle anderen Fälle bewirken eine negative oder keine Änderung der Bewertung.

3 THERMISCHE BEWERTUNGSFUNKTION

Das Konzept der thermischen Bewertungsfunktion beruht auf einer multiplen Regressionsanalyse, dessen Parameter durch eine statistische Versuchsplanung ermittelt werden. Hierzu wurde eine 2D-Simulationsumgebung mittels Finiten Volumen Methode (FVM) erstellt. Dadurch ist es möglich eine sehr genaue Temperaturverteilung an einem plattenförmigen Formteil in Abhängigkeit von der Lage der Kühlkanäle zu simulieren. Mittels entstandener Regressionsparameter kann eine Datenbank angelegt werden, welche anhand von Eigenschaften der Kühlkanäle die passenden Koeffizienten findet. Folglich ist es möglich, ohne eine langwierige thermische Simulation jedes Kühlkanalverlaufes, in jeder Iteration sehr schnell auf eine gute Annäherung für die Temperaturverteilung zu schließen. Die multiple Regression, die Simulationsumgebung sowie die Datenbank werden im Folgenden genauer erläutert.

3.1 Multiple Regression

Für die thermische Bewertungsfunktion wird ein Regressionsmodell eingesetzt, welches charakteristische Formteilmperaturen zum Zeitpunkt der Entformung (Zielgrößen y) aus einer Simulationsreihe mit einer quadratischen Abhängigkeit von drei Faktoren (x_1, x_2, x_3) approximiert [Kle06]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} x_i^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 \quad (Gl. 3.1)$$

Die Simulationsergebnisse y_n werden in Abhängigkeit der drei Faktoren und der Regressionskoeffizienten b mit einem zentral zusammengesetzten Versuchsplan, dem sog. Central-Composite-Design (CCD), generiert [SBH10, Kle06]. Dieses besteht aus einem 2^3 Faktorenversuchsplan, bei welchem die Faktoren x_i systematisch auf zwei Faktoreinstellungen (-1, +1) variiert werden. Die Faktoren x_i werden dimensionslos in das Regressionsmodell eingesetzt und sind für das Intervall [-1, 1] definiert.

3.2 Aufbau der 2D-Simulationsumgebung

Um die Temperaturverteilung im Formteil und im Werkzeug charakterisieren zu können, wird die Abkühlung eines plattenförmigen Bauteils mit verschiedenen Kühlkanalanordnungen und Temperaturen analysiert. Dazu wird eine flexible 2D-Simulationsumgebung mit dem Programm Matlab, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, USA, genutzt.

3.2.1 Modellbildung und Diskretisierung

Bild 3 zeigt schematisch ein Werkzeug zur Herstellung eines plattenförmigen Spritzgießbauteils. Die Abkühlung erfolgt durch ein angeordnetes Kühlkanalsystem. Die Abkühlsimulation kann durch einen 2D Ansatz beschrieben werden, weil eine Wärmeabfuhr in z-Richtung unbedeutend ist. Um die Komplexität einfach zu halten und das Regressionsmodell sinnvoll nutzen zu können, wird die gesamte Simulationsumgebung auf Ober- und Unterseite in einzelne Abschnitte zwischen zwei Kühlkanälen unterteilt. Die Temperaturen auf den Grenzen können vereinfacht durch den Mittelwert der benachbarten Abschnitte bestimmt werden.

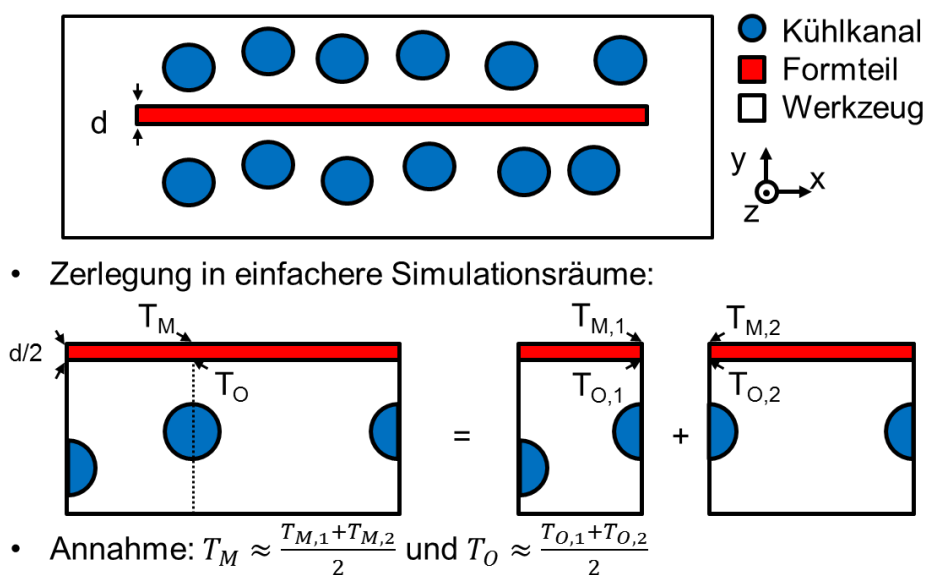


Bild 3: Darstellung der 2D-Simulationsumgebung und deren Aufteilung in Abschnitte

Die Diskretisierung erfolgt durch eine FVM mit einem kartesischen Gitter. Die Grundlage für die thermische Simulation ist die Energiebilanz. Diese vereinfacht sich im 2D Raum zu:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = a \cdot \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} \right) \quad (\text{Gl. 3.2})$$

Unter Zuhilfenahme von Umformungen und Annahmen lässt sich diese Gleichung wie folgt approximieren:

$$(T_P - T_{P,0}) \Delta x \Delta y = a \cdot \int_t^{t+\Delta t} \left(\frac{T_O - 2T_P + T_W}{\Delta x} \Delta y + \frac{T_O - 2T_P + T_W}{\Delta y} \Delta x \right) dt \quad (\text{Gl. 3.3})$$

Zur Diskretisierung des Integrals bietet sich die folgende Formulierung an [VM95]:

$$\int_t^{t+\Delta t} [...] dt = [\theta \cdot [...] + (1 - \theta) \cdot [...]]_0 \cdot \Delta t \quad (\text{Gl. 3.4})$$

Dabei wird mit θ ein Gewichtungsfaktor zwischen 0 und 1 eingeführt. Für $\theta = 1$ ergibt sich eine implizite Formulierung, welche die stabilere und somit numerisch bessere Methode darstellt.

3.2.2 Modellierung des Spritzgießprozesses

Damit die Simulationsumgebung möglichst realistische Ergebnisse liefert, wird ein eingeschwungenes System mit entsprechenden Wärmeübergängen sowie Stoffwerte und Anfangstemperaturen benötigt. Es wurde daher eine Validierung mit realen Versuchen und der Spritzgießsimulationssoftware Sigmasoft, Sigma GmbH, Aachen, durchgeführt, wodurch die 2D-Simulationsumgebung den realen Spritzgießprozess hinreichend genau abbildet [Röb14].

3.3 Aussehen der Datenbank

Die Datenbank, welche zur Bewertung benötigt wird, enthält Werte für alle physikalisch sinnvollen Konfigurationen für zwei Kühlkanäle. Jede dieser Konfigurationen in der Datenbank enthält die Regressionskoeffizienten für die Temperaturen auf der Oberfläche und Mitte des Formteiles an sechs speziellen Punkten. Diese Punkte befinden sich jeweils oberhalb bzw. unterhalb der Kühlkanäle, also am Rand des Abschnittes, sowie genau in der Mitte zwischen den beiden Kühlkanälen.

Insgesamt muss die Datenbank als Suchanfrage die Eigenschaften des Abstandes von zwei Kühlkanälen untereinander, deren Radien, die jeweiligen Abstände zum Formteil, die Dicke des Formteiles in dem Abschnitt, sowie die Anfangstemperaturen vom Formteil und der beiden Kühlkanäle erhalten. Diese sind in Tabelle 1 übersichtlich dargestellt und beschreiben den Teilabschnitt zwischen zwei Kühlkanälen vollständig. Da das Regressionsmodell nur für drei verschiedene Faktoren x_i genutzt werden kann, sind nur die sich häufig ändernden Parameter innerhalb einer Iteration des Algorithmus als Faktoren zu wählen (in Tabelle 1 markiert).

Eigenschaften des Teilabschnittes	Kühlkanal	Formteil
Längen	Abstand Kühlkanal 1 zum Formteil x_1	Dicke des Formteiles d
	Abstand Kühlkanal 2 zum Formteil x_2	
	Radius von Kühlkanal 1 r_1	
	Radius von Kühlkanal r_2	
	Abstand der Kühlkanäle untereinander x_3	
Temperaturen	Temperatur Kühlkanal 1 TK_1	Temperatur des Formteiles TF
	Temperatur Kühlkanal TK_2	

Tabelle 1: Eigenschaften eines Teilabschnittes zur vollständigen Beschreibung

Besonders die Radien und die Dicke sowie die Starttemperaturen innerhalb des Algorithmus ändern sich während der Iterationen nicht. Daher werden diese in der Datenbank als feste Eigenschaft behandelt und unterteilen somit die Datenbank in mehrere kleinere Unterdatenbanken. Diese Unterdatenbanken werden als einzelne Datei gespeichert. Es muss für den Algorithmus davon ausgegangen werden, dass die Datenbank umfangreich genug ist, um für jede Kombination aus Eingangswerten passende Regressionskoeffizienten zu finden. Die Implementierung der Datenbank wird im nächsten Kapitel genauer beschrieben.

4 IMPLEMENTIERUNG DER THERMISCHEN BEWERTUNGSFUNKTION IN DIE SOFTWARE

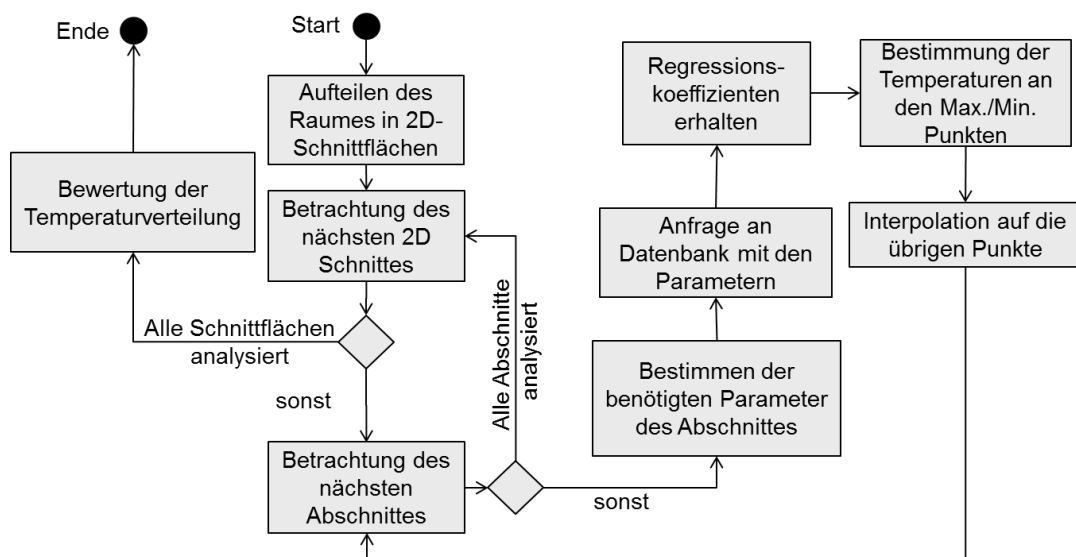


Bild 4: Ablauf der thermischen Bewertungsfunktion

Zunächst kann festgehalten werden, dass die geometrische Bewertungsfunktion weiterhin essenziell für die Bewertung bleibt, da ansonsten keine Machbarkeit der Konstruktion gewährleistet werden kann. Die Bewertung des Einflussbereiches der Wärmeabfuhr in der geometrischen Bewertungsfunktion kann hingegen durch die thermische Bewertungsfunktion

ersetzt werden. Daher ist die thermische Bewertungsfunktion als eine zusätzliche Funktion in den Ablauf zu integrieren. Die geeignetste Stelle für die Implementierung ist somit direkt vor oder nach der vereinfachten geometrischen Bewertungsfunktion. Da die beiden Bewertungsfunktionen unabhängig voneinander sind, ergeben sich keine Vorteile bei der Reihenfolge. Der schematische Ablauf der thermischen Bewertungsfunktion ist in Bild 4 dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Teile dieses Ablaufes genauer anhand eines plattenförmigen Formteiles erläutert.

4.1 Aufteilen des Raumes in 2D-Schnittflächen

Der 3D-Raum besteht aus einer Punktwolke mit gleichverteilten Punkten in jeder Dimension. Um die Ergebnisse der 2D-Simulationsumgebung anwenden zu können, ist eine Aufteilung in spezielle 2D-Flächen notwendig. Die Unterteilung des Raumes wird anhand des Formteiles und der Richtung der Kühlkanäle durchgeführt. Am Beispiel der Platte in Bild 2 wird der Raum entlang der z-Achse unterteilt. Es müssen alle 2D-Flächen analysiert werden, damit alle Bereiche abgedeckt werden können. Daher wird eine Schleife über alle Flächen benötigt.

Implementiert wird die Bestimmung der Flächen, indem auf die Eigenschaft der dünnsten Seite des Formteiles (x-Richtung bei Platte) sowie die Richtung der Kühlkanäle (z-Richtung) zugegriffen wird. Anhand dieser beiden Parameter kann der Normalenvektor der Fläche bestimmt werden. Diese entsteht aus dem Kreuzprodukt der Richtungsvektoren. Die Richtungsvektoren sind senkrecht zur Richtung der Kühlkanäle (y-Richtung) sowie parallel zur Richtung der dünnsten Seite (x-Richtung). Für eine bessere Betrachtung wird die Fläche anschließend durch die Mitte des Formteiles unterteilt, damit beide Seiten mit Kühlkanälen getrennt voneinander untersucht werden können.

4.2 Bestimmen der nötigen Parameter des Abschnittes

Für jede 2D-Fläche müssen die einzelnen Abschnitte zwischen zwei Kühlkanälen und deren spezielle Parameter gefunden werden. Dies ist beispielhaft in Bild 5 zu sehen. Die unterschiedlichen Abschnitte können bestimmt werden, indem die gesamte Fläche systematisch von oben nach unten untersucht wird. Da jeder Kanalmittelpunkt speziell definiert ist und die Position seines Punktes im Raum, seinen Radius sowie seine Anfangstemperatur kennt, können alle Kanäle innerhalb der Fläche durch eine einfache Sortierung in die richtige Reihenfolge samt passendem Mittelpunkt, Radius und entsprechender Temperatur gebracht werden. Gleichzeitig kann damit leicht der Abstand zu benachbarten Kühlkanälen gefunden werden. Der genaue Abstand der Kühlkanalmittelpunkte zum Formteil kann über die Richtung der dünnsten Seite bestimmt werden. Dazu wird vom Mittelpunkt des Kühlkanals aus der Abstand in Richtung der dünnsten Seite gesucht (x_1 in Bild 5), welcher benötigt wird, um auf das Formteil zu treffen (x-Richtung). Die letzten

fehlenden Parameter sind die Anfangstemperatur, sowie die Dicke des Formteiles, welche bei dessen Erstellung definiert werden müssen, also auch direkt abgefragt werden können. Dieser Prozess muss für jeden Abschnitt jedes Schnittes durchgeführt werden, was wiederum durch eine Schleife erreicht wird. Falls ein Schnitt keinen oder nur einen Kühlkanäle beinhaltet, sind auch für diesen Fall in der Datenbank spezielle Konfigurationen enthalten, um die Temperatur anzunähern.

1. Abschnitt auf Kühlkanäle untersuchen
2. Mittelpunkt gefundener Kanäle als Begrenzung auswählen
3. Abstände, Radien Dicke des Formteiles und Temperaturen ermitteln

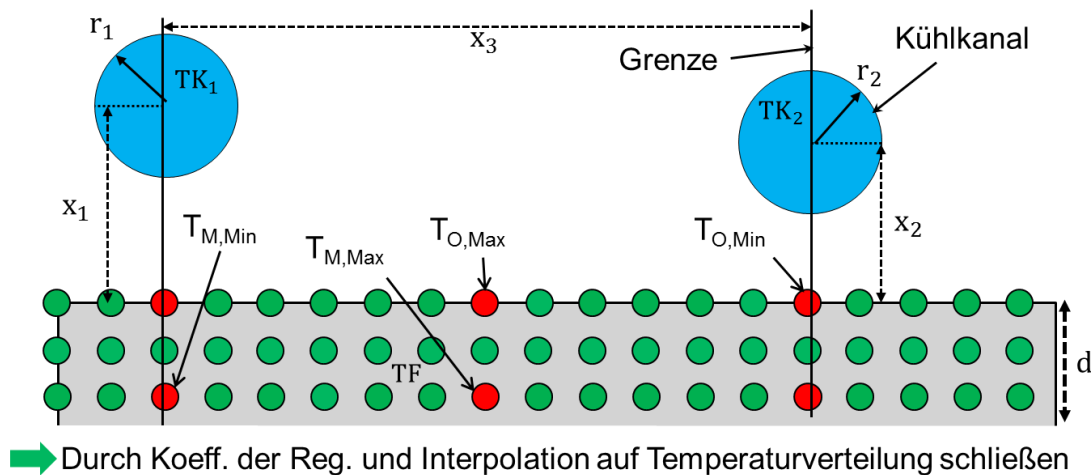


Bild 5: Bestimmung der Parameter der thermischen Bewertungsfunktion

4.3 Anfrage an Datenbank mit den Parametern

Nach der Bestimmung aller nötigen Parameter eines Abschnittes kann eine Suchanfrage an die Datenbank gesendet werden, welche die entsprechenden Regressionskoeffizienten für die sechs passenden Stellen (in Bild 5 rot markiert) am Formteil zurückgibt. Damit das Durchsuchen der Datenbank möglichst schnell abläuft, sollte sich diese innerhalb des RAMs befinden, wodurch das Durchsuchen deutlich schneller abläuft. Durch den besonderen Aufbau der Datenbank reicht das Einlesen der passenden Unterdatenbank, da sich die Radien, die Anfangstemperaturen sowie die Dicke der Platte nicht ändern. Das Einlesen der Unterdatenbank beginnt mit dessen Suche. Die Simulationsergebnisse aller Konfigurationen werden dazu lokal in einem Ordner gespeichert und anhand ihrer festen Parameter in einzelne Dateien mit speziellen Namen unterteilt. Anhand dieses Dateinamens, kann die Datei gefunden und anschließend komplett in eine Datenstruktur eingelesen werden. Die Datenstruktur besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil enthält Intervalle der weiteren Eingabeparameter, also Intervalle von Abstände der Kühlkanäle zum Formteil und untereinander, in denen die passenden Regressionskoeffizienten gültig sind. Der zweite Teil besteht aus den Koeffizienten für die sechs Punkte des Formteiles.

Bei einer Anfrage an die eingelesene Datenbank werden nur die drei variablen Parameter, eingeordnet in ihr entsprechendes Intervall, benötigt. Die Größe der Intervalle liegt dabei beispielsweise im Bereich von 10 mm für die Abstände, also ginge das kleinste Intervall von 5 mm bis 15 mm. Die Einordnung und das Finden der passenden Unterdatenbank kann durch einfache if-statements leicht erreicht werden. Falls keine passende Datenbank gefunden wurde, gibt es eine Fehlermeldung.

4.4 Regressionskoeffizienten und Temperatur erhalten

Wenn die passende Unterdatenbank für die Parameter eines Abschnittes gefunden ist, werden die Regressionskoeffizienten für die Bestimmung der sechs einzelnen Temperaturen nacheinander geladen. Da die Faktoren x_i nur in einem Intervall von -1 bis 1 definiert sind, ist eine Umrechnung der tatsächlichen Werte in dieses Intervall notwendig. Diese Umrechnung ist wie folgt definiert:

$$-1 + \frac{2}{a} * (x_{intervall} - b) = x_i \quad (\text{Gl. 4.5})$$

Die -1 am Anfang der Gleichung ist die untere Grenze des Intervalls der Faktoren. Die 2 ist die Gesamtgröße des Intervalls der Faktoren. Das a steht für die Größe des Intervalls in der Datenbank (z.B. 10 mm) und $x_{intervall}$ steht für den eigentlichen gefundenen Wert des Abschnittes. Zuletzt steht das b für die untere Grenze des Intervalls der Datenbank. Durch diese Umrechnung und die Regressionsparameter kann die Temperatur der Punkte mittels Gleichung 3.1 bestimmt werden. Dabei ist zu beachten, dass stets der Mittelwert von beiden Abschnitten eines Kühlkanals gebildet wird, da es ansonsten zu erhöhten Fehlern kommt (Bild 3).

4.5 Interpolation auf die übrigen Punkte

Damit nun an allen Punkten des Formteils die Temperatur bestimmt werden kann, muss eine Interpolation zwischen den sechs Punkten stattfinden. Dazu wird eine lineare Abnahme bei einem Maximum beziehungsweise Zunahme der Temperatur bei einem Minimum angenommen. Die Temperaturen unmittelbar an den Kühlkanälen sind lokale Minima, da hier die Wärmeabfuhr am meisten Einfluss hat. In der Mitte der beiden Kühlkanäle wird sich das Maximum der Temperaturen befinden. Die Interpolation findet in jede Richtung statt, daher wird zunächst horizontal interpoliert, um die Oberflächentemperatur und die der Mitte des Formteils zu erhalten und anschließend wird in die Tiefe, also zwischen Oberfläche und Mitte interpoliert. Der Wert der Interpolation bestimmt sich aus dem Temperaturunterschied von Maximum und Minimum sowie deren Abstand zueinander und ergibt folgende Formel:

$$\frac{T_{mp_{Max}} - T_{mp_{Min}}}{\text{Abstand der Punkte}} = \Delta T \quad (\text{Gl. 4.6})$$

Demnach muss die Temperatur zwischen den beiden Punkten pro Schritt immer um ΔT erhöht bzw. verringert werden. Da die Abstände und Temperaturen bekannt sind, kann die Interpolation direkt durchgeführt werden, ohne weitere Parameter bestimmen zu müssen.

4.6 Bewertung der Temperaturverteilung

Zur eigentlichen Bewertung der Güte wird die Temperaturverteilung nach Bestimmung aller Temperaturen des Formteiles genutzt. Diese Verteilung liefert eine Aussage über die Inhomogenität der Temperatur in Bereichen des Formteiles. Die Güte der Bewertung wird anhand von lokalen und globalen Temperaturgradienten in der Mitte sowie auf der Oberfläche des Formteiles gebildet. Je geringer diese Gradienten und tiefer die mittlere Temperaturen des Formteiles umso homogener und schneller ist in der Theorie die Abkühlung. Gerade bei der Entstehung von Hot-Spots durch schlechte Wärmeabfuhr steigen die Temperaturgradienten sehr stark an und führen zu einer dementsprechend schlechten Güte. Eine genaue Höhe der Bewertung der einzelnen Temperaturgradienten kann jedoch ohne die implementierte Funktion nicht vorhergesagt oder bestimmt werden. Daher liefert dieser Abschnitt nur die grundsätzliche Idee der Bewertung.

5 FAZIT & AUSBLICK

Das Konzept der neuen Bewertungsfunktion liefert dem evolutionären Algorithmus die Fähigkeit, anhand der Temperaturverteilung eine Bewertung durchzuführen. Diese ist durch die validierten Ergebnisse der 2D-Simulationsumgebung deutlich besser geeignet, als die bisherige geometrische Bewertung über den kreisförmigen Einflussbereich. Die genutzten Werkzeuge der Regressionsanalyse und der Simulationsumgebung in Matlab können wie erläutert als eine Datenbank genutzt werden, um schnellstmöglich Simulationsergebnisse für verschiedenste Kühlkanalverläufe zur Verfügung zu stellen. Diese Datenbank kann anhand der unterschiedlichen Konfigurationen in kleine Unterdatenbanken gegliedert werden. Die Aufteilung des 3D-Raumes sowie die Bestimmung der notwendigen Parameter für die Datenbank kann durch bereits bekannte Größen des Programmes weitestgehend erreicht werden. Für die lineare Interpolation zwischen den maximalen und minimalen Temperaturen ist eine Gleichung und Vorgehensweise zur Implementierung ermittelt. Die größte Herausforderung stellt die eigentliche Bewertung der Temperaturverteilung dar, welche jedoch ohne die Implementierung der neuen Bewertungsfunktion nicht zielführend durchgeführt werden kann. Die gesamte Implementierung und Analyse dieser neuen Bewertungsfunktion sollte anhand einer weiteren Arbeit untersucht werden.

6 LITERATUR

- [FKN11a] FABNACHT, P.; KERKELING, J.; NICKEL, R.: Künstlich-intelligent statt manuell. *Plastverarbeiter* 62 (2011) 3, S. 72-73
- [FKN11b] FABNACHT, P.; KERKELING, J.; NICKEL, R.: Keep it cool mit KI. *kunststoff-magazin* 48 (2011) 9, S. 18-19
- [Kit11] KITA, E.: *Evolutionary Algorithms*. Rijeka: InTech, 2011
- [Kle06] Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2006
- [Koc02] KOCH, M.: Konzepte für die Werkzeugtemperierung. *Kunststoffe* 92 (2002) 11, S. 28-36
- [Mes13] Meschede, K.: Aufbau eines evolutionären Algorithmus zur Generierung von Kühlkanälen in Spritzgießwerkzeugen. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Bachelorarbeit 2013 – Betreuer: P. Nikoleizig
- [MMBH04] MEHNEN, J.; MICHELITSCH, T.; BARTZ-BEIELSTEIN, T.; HENKENJOHANN, N.: Systematic analyses of multi-objective evolutionary algorithms applied to real-world problems using statistical design of experiments. In: Teti, R. (Hsrg.): *Proceedings Fourth International Seminar Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*. Naples: CIRP ICME'04, 2004, S. 171-178
- [MMBS04] MEHNEN, J.; MICHELITSCH, T.; BEIELSTEIN, T.; SCHMITT, K.: Evolutionary Optimization of Mold Temperature Control Strategies. *Journal of Engineering Manufacture (JEM)* 218 (2004) B6, S. 657-665
- [MMLB07] MEHNEN, J.; MICHELITSCH, T.; LASARCZYK, C.; BARTZ-BEIELSTEIN, T.: Multi-objective evolutionary design of mold temperature control using DACE for parameter optimization. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 25 (2007) 1-4, S. 661-667
- [MMM07] MENGES, G.; MICHAELI, W.; MOHREN, P.: *Spritzgießwerkzeuge. Auslegung, Bau, Anwendung*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2007
- [MWM02] MEHNEN, J.; WEINERT, K.; MICHELITSCH, T.: Evolutionäres Design der Temperierbohrungen für Spritzguss- und Druckgusswerkzeuge. *wt Werkstattstechnik online* 92 (2002) 11/12, S. 588-590
- [Nis97] NISSEN, V.: *Einführung in Evolutionäre Algorithmen: Optimierung nach dem Vorbild der Evolution*. Wiesbaden: Vieweg Friedr. + Sohn Verlag, 1997
- [Röb14] Röbig, M.: Analyse der Veränderung der lokalen Temperaturverteilung in Spritzgießwerkzeugen in Abhängigkeit von der Gestaltung und Position des Kühlkanalsystems. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Masterarbeit 2014 – Betreuer: P. Nikoleizig
- [SBH10] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: *Statistische Versuchsplanung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010
- [Wei07] WEICKER, K.: *Evolutionäre Algorithmen*. Wiesbaden: Teubner Verlag, 2007
- [Zöl99] ZÖLLNER, O.: *Optimierte Werkzeugtemperierung*. Bayer AG, Leverkusen, 1999