

# Temperierbohrungen von Druckgußwerkzeugen

Thomas Tometzki

29. März 2003

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Problemdarstellung</b>	<b>4</b>
2.1	Einige relevante Begriffe beim Spritzgießen . . . . .	4
2.1.1	Kühlzeit und Zykluszeit . . . . .	4
2.1.2	Fließverhalten und Werkzeugkühlung . . . . .	5
2.1.3	Abkühlzeit und Werkzeugtemperierung . . . . .	5
2.1.4	Werkzeugtemperierung und Verzug . . . . .	5
2.1.5	Werkzeugtemperierung und Oberflächenqualität . . . . .	6
2.2	Temperierung von Spritzgießwerkzeugen . . . . .	7
2.2.1	Thermodynamisches System eines eingebauten Werkzeuges . . . . .	8
2.2.2	Anlage von Temperiersystemen in Werkzeugen . . . . .	8
2.2.3	Temperierung flächenförmiger Teile . . . . .	8
2.2.4	Abstand Temperierkanal-Werkzeugkavität . . . . .	9
2.2.5	Abstand der Temperierkanäle zueinander . . . . .	9
2.2.6	Durchmesser der Temperierkanäle . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Existierende Lösungsansätze für das optimale Auslegen von Temperierbohrungen</b>	<b>11</b>
3.1	Das Optimierungsproblem . . . . .	11
3.2	Konturangeglichene Kühlkanäle . . . . .	11
3.3	Evolutionäres Optimierungsverfahren . . . . .	12
3.3.1	Qualitätsfunktion . . . . .	12
3.3.2	Evolutionäres Verfahren zur Minimierung . . . . .	13

# Abbildungsverzeichnis

1	Druckgußwerkzeug . . . . .	3
2	Optimierte Werkzeugtemperierung . . . . .	4
3	Winkelverzug durch Temperaturdifferenzen . . . . .	6
4	Glanzgradunterschiede bei unterschiedlichen Formtemperaturen . . . . .	7
5	Einfluss des Abstandes . . . . .	10
6	Durchmesser und Lage von Temperierkanälen . . . . .	10
7	Aufnahmen mit einer Infrarotkamera direkt nach dem Auswerfen der Formteile mit herkömmlicher (links) und konturangeglichener (rechts) Temperierung . . . . .	12

# 1 Einleitung

”Temperierbohrungen von Druckgußwerkzeugen” ist ein Beispiel aus der industriellen Praxis, in dem heuristische Optimierungsverfahren eingesetzt werden können. Das Problem der optimalen Auslegung von Temperierbohrungen von Druckgußwerkzeugen tritt in der Industrie bei der Herstellung von aus Aluminium gegossenen Formteilen auf.

Beim Druckgießen wird flüssige heiße Schmelze z.B. Aluminium unter hohem Druck in einen Hohlraum einer Stahlform eingespritzt (Abbildung 1). Dieser Hohlraum wird durch das Aluminium ausgefüllt und bildet so das Formteil. Durch die hohe Temperatur des Werkstoffs wird eine hohe Temperatur in die Stahlhohlform eingebracht, die sich in Form von Spannungen äussert. Zum Ausgleich werden in die Hohlformen Temperierbohrungen eingebracht, durch die ein Wasser-Öl-Gemisch strömt. Das dabei entstehende Bohrungsnetz muss die Hohlformen geeignet kühlen, gleichzeitig jedoch einer Reihe technischer Anforderungen genügen (minimale Bohrungszahl, kurze Kreislaufänge etc.). Die optimale Positionierung der Bohrungen ist somit ein komplexes Problem und kann mit Hilfe heuristischer Verfahren gelöst werden.



Abbildung 1: Druckgußwerkzeug

## 2 Problemdarstellung

Für eine gleichbleibende Qualität der Formteile ist die Temperierung des Werkzeugs wichtig. Sie beeinflusst stark die Werkstückqualität. Um eine schnelle Entformung und damit eine kurze Zykluszeit zu gewährleisten, sollte die Werkzeugtemperatur deutlich unter der Kristallisations- bzw. Erweichungstemperatur der Formmasse liegen. Eine gleichmäßige Kühlung des Formteils ist anzustreben, um Verzug und Eigenspannungen zu vermeiden. Häufig helfen bei der Einstellung der Temperaturen Merkblätter zu den Rohstoffen, die empirisches Wissen gespeichert haben. Aus Gründen der Produktivität, sollte die Werkzeugtemperatur so niedrig wie möglich eingestellt werden, da hierdurch die Kühlzeit stark beeinflusst werden kann (Abbildung 2).

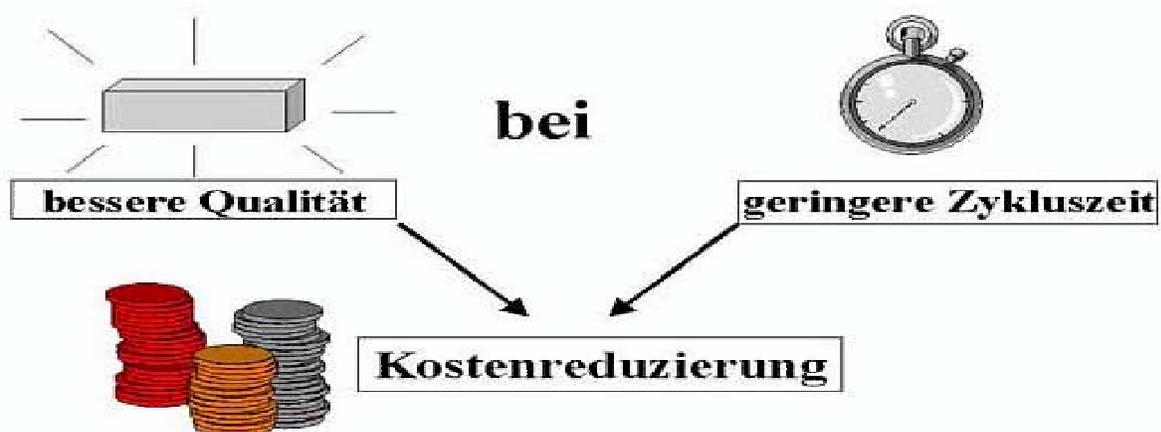


Abbildung 2: Optimierte Werkzeugtemperierung

### 2.1 Einige relevante Begriffe beim Spritzgießen

#### 2.1.1 Kühlzeit und Zykluszeit

Die Kühlzeit ist bei den meisten Spritzgießprozessen für die Zykluszeit am stärksten bestimmende Größe. Sie lässt sich im Vorfeld rechnerisch bestimmen, oder kann durch Versuche an der Maschine ermittelt werden. In diesem Fall wird die Kühlzeit schrittweise so

weit reduziert, dass ein stabiles Teil entformt wird, das keine Verzugserscheinungen mehr aufweist. Bei der Kühlzeit ist die Wirtschaftlichkeit ein entscheidender Aspekt, dabei muss aber berücksichtigt werden, dass diese auch einen starken Einfluss auf die Qualität der Formteile ausübt.

Hier setzt unser Optimierungsproblem an, und versucht mit optimiertem Kühlsystem die Zykluszeit herabzusetzen, wobei bestimmte Eigenschaften des Werkstücks eingehalten werden müssen. Weitere Eigenschaften werden in folgenden Abschnitten erklärt.

### **2.1.2 Fließverhalten und Werkzeugkühlung**

Das Fließverhalten von Schmelzen kann durch entsprechende Temperaturführung im Spritzgießwerkzeug beeinflusst werden. Bei höheren Werkzeugtemperaturen ist in der Regel mit einem besseren Fließverhalten zu rechnen; ein Umstand, den Praktiker oft nutzen, um Erscheinungen am gespritzten Formteil zu beseitigen, die auf eine unvollkommene Füllung der Kavität infolge zu rascher Abkühlung der zufließenden Schmelzstromes zurückzuführen sind. Als Kavität wird der Hohlraum bei Spritzgießwerkzeugen bezeichnet, welcher später mit Schmelze gefüllt wird.

Die Temperaturinstabilitäten von Formmassen sowie die unwirtschaftliche Verlängerung der Abkühlzeit begrenzen jedoch die Manipulationen mit höheren Werkzeugtemperaturen. Besonders die Zeit, die ein eingespritztes Werkzeug braucht, um die Formteile auf vertretbare Erstarrungstemperaturen abzukühlen, beeinflussen in hohem Masse den Gesamtarbeitszyklus und damit die Wirtschaftlichkeit der Produktion.

### **2.1.3 Abkühlzeit und Werkzeugtemperierung**

Eine intensive Werkzeugkühlung setzt in den meisten Fällen die Abkühlzeit herab. Bei Formteilen mit unterschiedlichen und insbesondere großen Wandstärken kann man die Werkzeugtemperatur jedoch nur in geringem Umfang reduzieren, sonst läuft man Gefahr, Spritzteile zu entformen, deren äußere Schicht zwar erstarrt, deren inneren Schichten jedoch noch plastisch sind. Derartige Spritzteile verändern ihre Gestalt sowie ihre Oberflächenbeschaffenheit nach dem Entformen und entsprechen nicht den an sie gestellten Anforderungen.

### **2.1.4 Werkzeugtemperierung und Verzug**

Auch die Schwindung von Formmassen gehört zu den Erscheinungen, die von der Werkzeugtemperaturführung beeinflusst werden. Bei der Verarbeitung von Formmassen lassen niedrige Werkzeugtemperaturen die gespritzten Formteile im Werkzeug weniger schwinden. Bei höheren Werkzeugtemperaturen zeigen diese Formmassen an den gepritzten Teilen eine größere Schwindungneigung.

Das Gegenteil passiert bei Formmassen mit amorpher Molekularstruktur (z.B. Polystyrol). Niedrige Temperaturabführung im Spritzgießwerkzeug führt zu Schwindungserscheinungen während des Abkühlprozesses. Hier ist unter Umständen die Gefahr von Rissbildung am Formteil gegeben.

Mitunter beobachtet man, dass sich die gespritzten Teile trotz konstanter Temperaturführung im Werkzeug nach dem Entformen verziehen (Abbildung 3). Die Ursache dafür kann unter Umständen in einem ungünstigen, ungleichmäßigen Temperaturgefälle zwischen Formteil und Werkzeug liegen. Meist zeigt sich Verzug an Formteilen mit unterschiedlichem Querschnitt. In solchen Fällen schafft nur eine Korrektur der Anordnung und des Querschnittes der Temperierkanäle Abhilfe.



Abbildung 3: Winkelverzug durch Temperaturdifferenzen

### 2.1.5 Werkzeugtemperierung und Oberflächenqualität

Auch auf der Oberfläche gepritzter Teile wirkt sich die Werkzeugtemperierung aus. Besonders bei höheren Temperaturen zeigt sich eine deutliche Verbesserung der aus ihnen hergestellten Formteile (Abbildung 4).

Voraussetzung ist allerdings, dass die Anflußwege zu den Formnestern verfahrensgerecht gestaltet wurden und dass das Nachdruckpotential der Spritzeinheit ausgenutzt worden

ist. Eine Erhöhung der Werkzeugtemperatur mit dem Ziel einer Verbesserung der Oberflächenqualität der geätzten Teile kann nur Erfolg haben, wenn innerhalb des Werkzeugs ein gleichmäßiges Temperaturniveau existiert. Bei ungleichmäßiger Temperaturführung zeigen die Formteile oft entsprechende Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit.

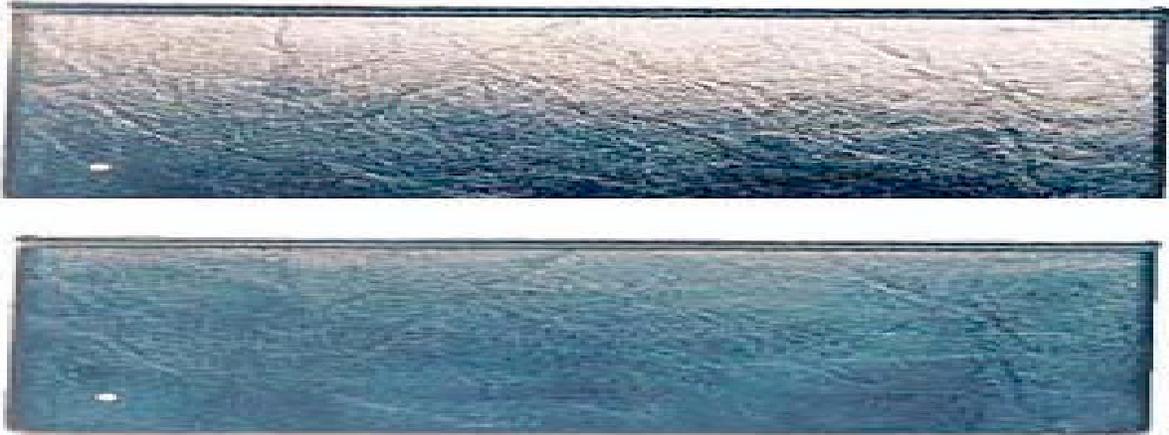


Abbildung 4: Glanzgradunterschiede bei unterschiedlichen Formtemperaturen

## 2.2 Temperierung von Spritzgießwerkzeugen

Das Temperiersystem eines Werkzeuges muss zwei Aufgaben erfüllen:

1. Aufbau einer möglichst gleichmäßigen Temperaturverteilung im Werkzeug.
2. Abführung der Wärme aus der mit Formmasse gefüllten Kavität.

Genau genommen treffen hier in den meisten praktischen Fällen zwei Forderungen zusammen, die in der Regel Kompromisse verlangen:

1. Technische Qualität der Spritzgußteile als Funktion der Gleichmäßigkeit der Temperaturverteilung im Werkzeug und der Höhe der Werkzeugtemperatur.
2. Wirtschaftliche Zykluszeiten durch schnelle Wärmeabfuhr aus der mit Formmasse gefüllten Kavität.

Welche Forderungen bei der Anlage des Werkzeugtemperiersystems überwiegt, hängt vom Werkstoff und von den verlangten Fertigteileigenschaften ab.

### 2.2.1 Thermodynamisches System eines eingebauten Werkzeuges

Die thermodynamischen Vorgänge in einem eingebauten Werkzeug sind:

1. Wärmeleitung (Wärmeübertragung innerhalb eines Stoffes).
2. Konvektion (Wärmeübertragung von einem flüssigen oder gasförmigen Medium auf einen festen Stoff bzw. umgekehrt).
3. Strahlung (Wärmeübertragung durch elektromagnetische Strahlung).

Während des Wärmedurchgangs vom Spritzgußteil zum Temperiermedium treten die oben genannten Vorgänge einzeln oder parallel auf. Die gesamte abzuführende Wärmeenergie aus einem Spritzgußteil lässt sich aus der Enthalpiekurve ermitteln. Es ist:

$$Q_{ab} = G_s(i_E - i_{mA}) \quad [kJ]$$

$G_s$  = Gewicht des Spritzlings [g]

$i_E$  = Enthalpie bei Eintritt in das Werkzeug [kJ/g]

$i_{mA}$  = Enthalpie bei mittlerer Entformungstemperatur [kJ/g]

### 2.2.2 Anlage von Temperiersystemen in Werkzeugen

Es werden immernoch Werkzeuge konstruiert, bei denen der Kontrukteur die Anlage der Temperierkanäle als letzte Arbeit vor der Fertigstellung der Zeichnung ausführt. Das Ergebnis ist, dass Temperierkanäle dort vorgesehen werden, wo gerade noch Platz zur Verfügung steht. Aus der Praxis sind auch Fälle bekannt, dass ein Werkzeugbauer an der Maschine ohne Zeichnungsunterlage die Werkzeugtemperierung herstellte. Solche Zufallsexperimente können zu Schwierigkeiten führen und müssen bei Werkzeugen zur Herstellung von Präzisionsteilen der Vergangenheit angehören. Das Präzisions-spritzgießen verlangt, dass der Werkzeugkonstrukteur die Temperierung bereits im Rahmen der Grundkonzeption eines neu zu erstellenden Werkzeuges mit in seine Überlegungen einbezieht.

### 2.2.3 Temperierung flächenförmiger Teile

Physikalisch ideal wäre es, wenn je ein Temperierkanal mit gleicher Breite wie der der Artikel in jeder Werkzeughälfte in unmittelbarer Nähe der Kavität läge. Unter Einwirkung des Spritzdruckes würde jedoch, abgesehen von Teilen mit geringer Breite, die Kavität ihre Form ändern.

Eine ausreichende Steifigkeit der Kavität gegen den Spritzdruck wird durch Unterbrechung des physikalisch idealen Temperierkanals mit Stegen erzielt. Diese technisch optimale Form setzt eine zusätzliche, festgefügte Teilung des Werkzeuges durch die Temperierkanäle und meistens ein aufwendiges Fräsen oder Drehen voraus und bringt nicht selten Dichtungsprobleme mit sich.

Technisch leicht realisierbar und deshalb sehr häufig angewandt werden Temperierkanäle mit rundem Querschnitt. Die runden Temperierkanäle haben jedoch bei gleichem Mass für Durchmesser wie Breite des rechteckigen Temperiekanals eine geringere Temperierwirksamkeit.

#### **2.2.4 Abstand Temperierkanal-Werkzeugkavität**

Je größer der Abstand gewählt wird, um so gleichmäßiger ist die Temperatur in der Werkzeugkavität und um so höher wird der Temperaturanstieg an der Oberfläche der Kavität beim Einspritzen. Dieser Tatbestand hat positive Folgen auf den Verzug, die mechanischen Eigenschaften der Teile und auf die Werkzeugfüllung. Je kleiner der Abstand gewählt wird, um so schneller wird die Wärme abgeführt und um so kürzer ist der Zyklus.

#### **2.2.5 Abstand der Temperierkanäle zueinander**

Je kleiner der Abstand der Temperierkanäle zueinander ist, um so gleichmäßiger ist die Werkzeugtemperatur (Abbildung 5). Treten jedoch konstruktionsbedingt grosse Abstände der Temperierkanäle zueinander auf, so müssen der Abstand der Kavität und der Kanaldurchmesser ebenfalls groß werden. Mit zunehmender Wanddicke muss mehr Wärme abgeführt werden; folglich müssen die Kanaldurchmesser größer werden.

#### **2.2.6 Durchmesser der Temperierkanäle**

Unter Berücksichtigung der aufgezeigten Forderungen und der gesammelten Erfahrungen müssen für die Lage und die Kanaldurchmesser zur Erzielung einer weichen Temperierung die in Abbildung 6 skizzierten Abmessungen angestrebt werden. Die Zusammenhänge zwischen der Dimensionierung der Temperiersysteme und einer gleichmäßigen Wärmeabfuhr sind durch eingezeichnete Isothermen verdeutlicht.

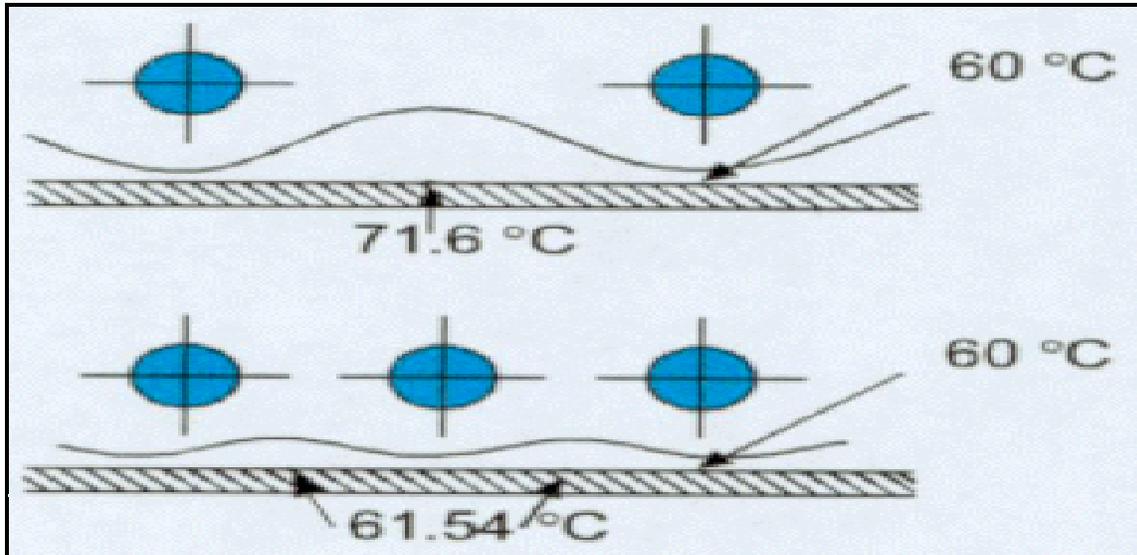


Abbildung 5: Einfluss des Abstandes

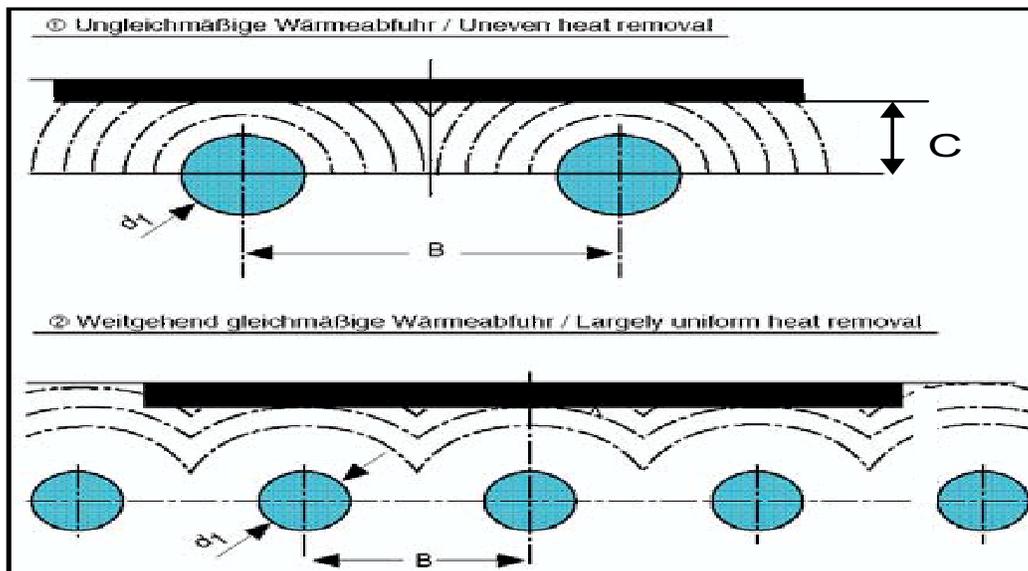


Abbildung 6: Durchmesser und Lage von Temperierkanälen

## **3 Existierende Lösungsansätze für das optimale Auslegen von Temperierbohrungen**

### **3.1 Das Optimierungsproblem**

Eine optimale Werkzeugtemperierung richtet sich nach den spezifischen Werkstoffeigenschaften, der Struktur der Formfläche sowie der zu erwartenden Schwindung und Eigenspannung im Werkstück nach dem Entformen. Neben der Kühlfunktion können Temperierbohrungen auch eine Heizfunktion übernehmen, um die ideale Arbeitstemperatur zu gewährleisten. Ein Vorheizen ist im Falle des Druckgießens besonders wichtig, um den erheblichen Eigenspannungen durch das Einbringen der heißen Werkstoffschmelze vorzubeugen. Die Ziele einer Werkzeugtemperierung sind somit:

- eine mittlere Formnest-Wandtemperatur,
- eine gleichmäßige Temperaturverteilung sowie
- eine kurz gehaltenen Kühlzeit

genau einzuhalten.

Das Temperieren von Druckguß- und Spritzgußwerkzeugen wird über ein System von Kanälen realisiert, durch die ein Medium fließt. Diese Kanäle werden als Tiefbohrungen mit Hilfe spezieller Tiefbohrmaschinen gefertigt. Es gilt, mit möglichst wenigen Bohrungen auszukommen, aufgrund der relativ hohen Kosten pro Bohrung sowie der Schwächung der Werkzeugform. Einzelne Bohrungen lassen sich zu Temperierbohrungszyklen kombinieren. Hierbei ist es möglich, einzelne Bohrungssegmente mit dem Verwenden von Stopfen mehrfach zu nutzen. "Tote" Kreisläufe innerhalb eines Temperierbohrungszyklus sind nicht erlaubt, sodaß die Fließrichtung des Kühlmediums immer klar definiert ist. Das Verwenden mehrerer, sich nicht schneidender Temperierzyklen sowie einzelner, als Sacklochbohrung mit innenliegendem Teilungsblech ausgeführter Steigerbohrungen, ist erlaubt und wird häufig speziell im Prototypenbau eingesetzt.

### **3.2 Konturangeglichene Kühlkanäle**

Der Formteilkontur angegliche Kühlkanäle in Spritzgießwerkzeugen sichern eine gute Wärmeabfuhr und sorgen so für kurze Zykluszeiten. Diese optimale Anordnung lässt sich jedoch nicht in konventioneller Bohrtechnik herstellen, sondern wird durch Verwendung eines Werkzeugeinsatzes mit oberflächennahen Kühlkanälen erzielt. Entwickelt und patentiert wurde ein solches System mit der Bezeichnung "Contura" von der Innova Engineering GmbH, Menden. Damit werden die Zykluszeiten durchschnittlich um 30 Prozent reduziert.

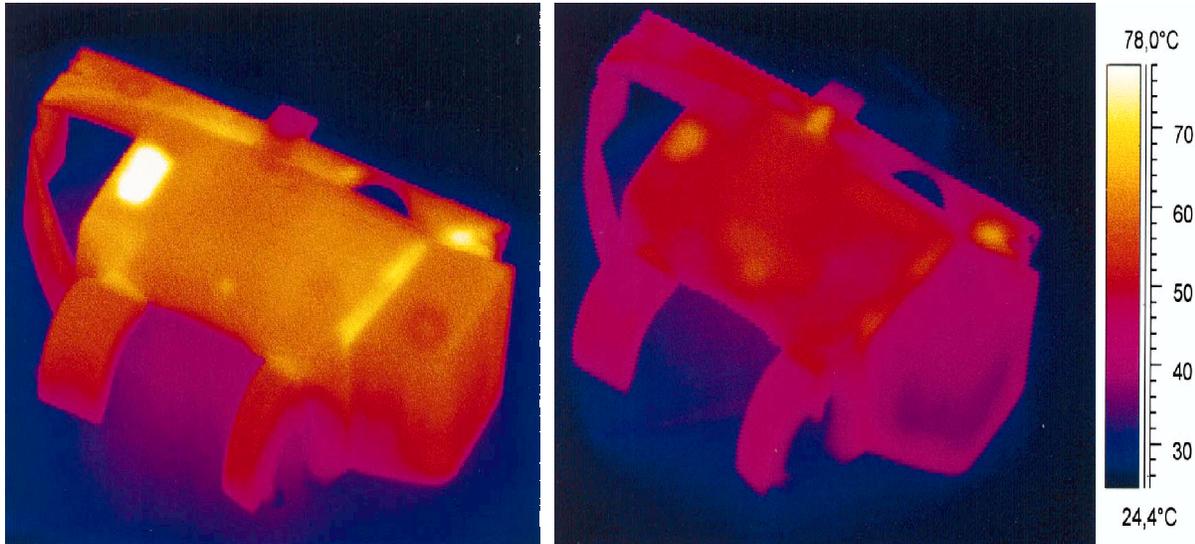


Abbildung 7: Aufnahmen mit einer Infrarotkamera direkt nach dem Auswerfen der Formteile mit herkömmlicher (links) und konturangeglichener (rechts) Temperierung

### 3.3 Evolutionäres Optimierungsverfahren

Im Folgenden wird ein Verfahren vorgestellt, das anhand effizienter mathematischer Schätzungen der Temperierwirkung der einzelnen Tiefbohrungszyklen, vollautomatisch optimierte Layouts für die Werkzeugtemperierung entwirft. Die vielfältigen Anforderungen und Restriktionen, die der Algorithmus gleichzeitig optimiert, können vom Anwender intuitiv modelliert und somit individuell und praxisnah eingestellt werden.

#### 3.3.1 Qualitätsfunktion

Das automatische Optimieren des Layouts von Temperierbohrungen verlangt ein rechnerisch auswertbares Mass, eine Qualitätsfunktion, oder im Operations Research auch Kosten- oder Zielfunktion genannt, das

- die physikalischen Eigenschaften des Wärmeaustausches,
- die Kosten durch die Fertigung der Bohrungen sowie
- die technischen Restriktionen

möglichst realitätsnah und effizient wiedergibt.

Da in der Praxis mehrere Anforderungen an eine Temperierbohrungen gleichzeitig gestellt werden, ist ein mehrkriterielles Maß notwendig. Im mathematischen Modell wird

ein Temperierbohrungszyklus als Polygonzug aus einzelnen miteinander gekoppelten Zylindern aufgefasst. Dieser Ansatz wird durch die Eindeutigkeit der Fließrichtung im Kühlkreislauf motiviert. Die Güte der Annäherung einer Bohrung an eine gegebene Formfläche hat wesentlichen Einfluss auf die Temperierwirkung. Dieser Wert wird von der Entfernung zur Formfläche bestimmt und indirekt proportional zum Kühlbedarf gesetzt. Der Kühlbedarf lässt sich aus dem zu kühlenden Volumen der Werkstückgeometrie berechnen und ist konstant. Nicht nur eine möglichst gute Annäherung, sondern auch eine gleichzeitig möglichst gleichmäßige Temperierung ist notwendig, um die Herstellung von Qualitätsformteilen zu gewährleisten. Die Gleichmäßigkeit kann durch die Verteilung der berechneten Kühlwirkung pro Formflächenelement geschätzt werden. Eine möglichst relativ zum Mittelwert kleine Standardabweichung der Kühlung pro Flächenabschnitt entspricht einer grossflächigen und gleichmäßigen Temperierung. Eine zusätzliche kubische Überhöhung schlecht gekühlter Bereiche vereinfacht die Suche nach optimalen Strukturen. Lange Tieflochbohrungen sind aufwendig und kostenintensiv und gehen daher in die Qualitätsfunktion entsprechend ihrer Länge als "Malus" ein. Ebenso werden Verletzungen des Sicherheitsabstandes zur Formfläche negativ gewertet und durch eine komplexe Straffunktion modelliert. Das System bietet die Möglichkeit, die einzelnen Qualitätsfunktionen auf beliebige Weise durch algebraisch beschreibbare Terme über eine Eingabefunktion zu einem Gesamtwert zu kombinieren. Der Optimieralgorithmus minimiert den Gesamtwert anschließend automatisch.

Bis hierher ist lediglich ein auswertbares Maß in Form einer Qualitätsfunktion definiert worden. Die Aufgabe ist es nun solche Funktionen mit einer geeigneten Strategien bzw. Optimieralgorithmen zu minimieren

**Suche neuer Strategien für die Wahl geeigneter Parameter ist u.a. die Aufgabe der Projektgruppe!**

### 3.3.2 Evolutionäres Verfahren zur Minimierung

Ein Verfahren zur Minimierung, die Darwinstrategie wird algorithmisch durch evolutionäre Algorithmen nachempfunden. Die Darwinstrategie beschreibt als stark vereinfachtes Modell die prinzipielle Fähigkeit der biologischen Evolution zur optimierenden Entwicklung. Dieses Verfahren gehört zur Klasse stochastischer Parameteroptimiermethoden und ist in der Lage, auch in komplexen Aufgabenstellungen überraschend gute Lösungen zu generieren.

Auf wesentliche Eigenschaften und Einführung in das Gebiet der Evolutionsstrategien wird hier nicht weiter eingegangen, da das bereits ein Thema eines anderen Seminarvortrages ist.

## Literatur

- [1] [www.plastics.bayer.de](http://www.plastics.bayer.de): "Werkzeugtemperierung"
- [2] ATI1146d BAYER AG: "Spritzgießen von Qualitätsformteilen"
- [3] H. Gastrow: "Der Spritzgieß-Werkzeugbau in Beispielen"
- [4] Kunststoffe 88 (1998) 7 S.984,985
- [5] J. Mehnen, K. Weinert, T. Michelitsch: "Evolutionäres Design der Temperierbohrungen für Spritzguß- und Druckgußwerkzeuge"
- [6] H.-P. Schwefel: "Evolution and Optimum Seeking"