

Perspektiven bei der Temperierung von
Problemzonen im Werkzeug

Dipl.-Ing. M. Berghoff



1. Einleitung

Um auch in der Zukunft konkurrenzfähig bleiben zu können, muß in der Kunststoffverarbeitung immer wieder nach neuen Möglichkeiten zur Kostenreduzierung oder zur Qualitätssteigerung gesucht werden.

Einer der Bereiche, in dem noch eine große Kostenreduzierung und Qualitätssteigerung bei der Herstellung von Kunststoffartikeln erreicht werden kann, ist die Temperierung von Spritzgießwerkzeugen.

Es kann allein durch die Optimierung der Kühlzeit durchschnittlich eine Zykluszeitverkürzung von mehr als 20 % erreicht werden (Bild 1). Die längere Zykluszeit beruht einerseits auf einer Einstellung der Kühlzeit mit zu hoher Sicherheit der Formstabilität, andererseits auf eine ungleichmäßige und schlechte Temperierung des Werkzeuges, bei der solange gewartet werden muss, bis auch der schlechteste gekühlte Bereich des Formteils erstarrt ist. Hierbei muss bewusst sein, dass 1 Grad Abweichung von der Solltemperatur der Kavität eine durchschnittliche Verlängerung der Kühlzeit um 2% bedeutet!

Um eine bessere und gleichmäßigere Temperierung zu erzielen gibt es ein Verfahren, welches zusätzlich zur Wassertemperierung kleine für Wasser unzugängliche Bereiche mit CO₂-Flüssiggas schnell kühlt.

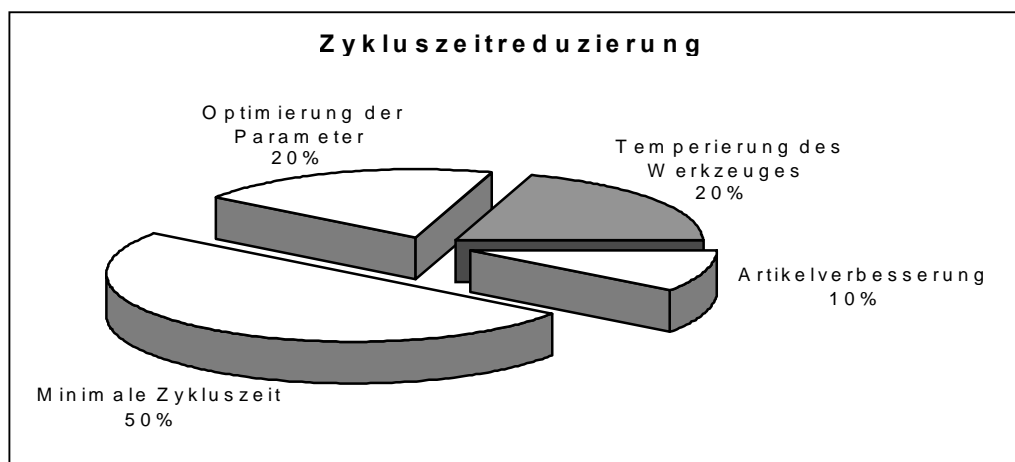


Bild 1: Zykluszeitreduzierung [11]

In Bild 2 sind die in der Praxis geforderten Hauptaufgaben und Ziele dargestellt.

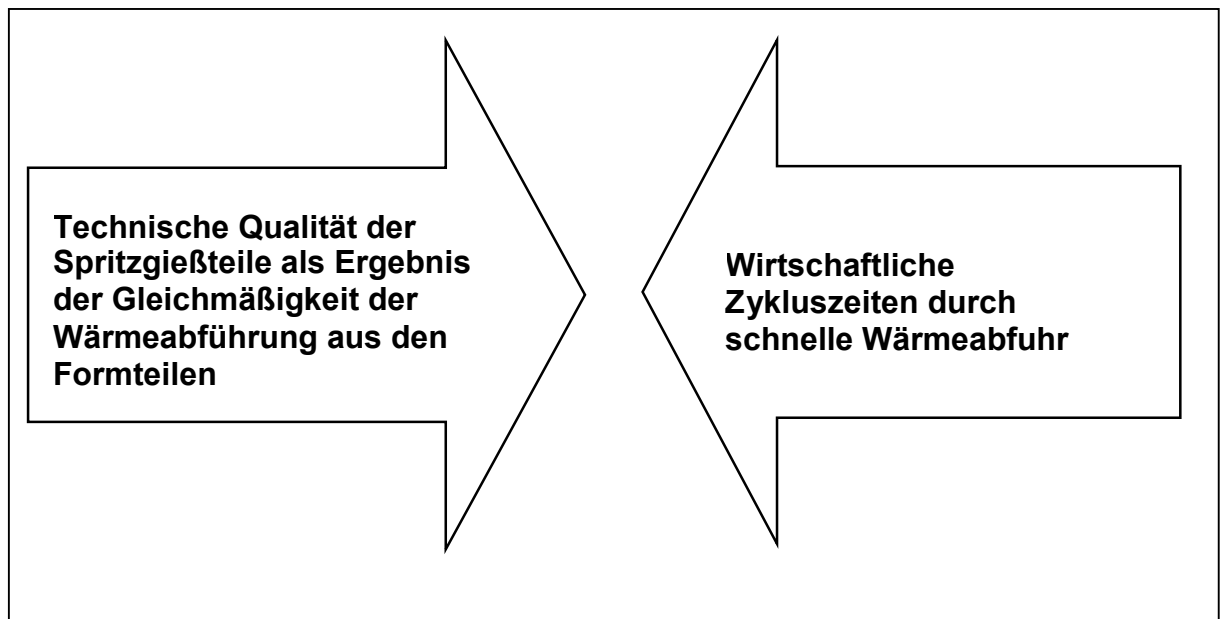


Bild 2: Hauptaufgaben einer Werkzeugtemperierung [7,12]

2. Einflußfaktoren auf die Zykluszeit t_z

- **Formteildicke s**
- Werkzeugwandtemperatur ϑ_W
- Entformungstemperatur ϑ_E
- Schmelztemperatur ϑ_M
- Material a_{eff}
- Nebenzeiten t_N

$$t_z = t_K + t_N$$

$$t_K = \frac{s^2}{\pi^2 * a_{\text{eff}}} * \ln \left\langle \frac{8}{\pi^2} * \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\vartheta_E - \bar{\vartheta}_W} \right\rangle$$

t_K = Zeit von der volumetrischen Formfüllung bis zum Entformen

2.1 Formteilwanddicke

- die Wanddicke s geht **quadratisch** in die Kühlzeitgleichung ein
- verdoppelt sich die Wanddicke, so vervierfacht sich die Kühlzeit
- für die Berechnung muß die für die Entformungsstabilität ausschlaggebende Wanddicke eingesetzt werden

$$t_K = \frac{s^2}{\pi^2 * a_{\text{eff}}} * \ln \left\langle \frac{\delta}{\pi^2} * \frac{\vartheta_M - \overline{\vartheta}_W}{\overline{\vartheta}_E - \overline{\vartheta}_W} \right\rangle$$

- Die Werkzeugwandtemperatur ϑ_W hat einen großen Einfluß auf die Kühlzeit
- Die Entformungstemperatur ϑ_E hat einen großen Einfluß auf die Kühlzeit
- Die Massetemperatur ϑ_M hat einen relativ geringen Einfluß auf die Kühlzeit

2.2 Temperaturen

Ausgehend von der "Normalkühlzeit" $t_{K,n} = 7,95$ s, die sich aus mittleren Verarbeitungsgrößen errechnen läßt - hier für Polystyrol (PS) :
 $s = 2$ mm,
 $\vartheta_M = 225^\circ\text{C}$, $\vartheta_W = 25^\circ\text{C}$, $\vartheta_E = 55^\circ\text{C}$,
 $a_{\text{eff}} = 0,086$ mm² / s
 - kann prozentual die relative Kühlzeitänderung $t_{K,rel}$ bei Änderung der Masse-, Wand- und Entformungstemperatur abgelesen werden (Bild 3).
 Man erkennt, daß die Wand- und Entformungstemperatur die Kühlzeit wesentlich stärker beeinflussen als die Massetemperatur.
 Im Normalpunkt n um einen Faktor größer sechs.

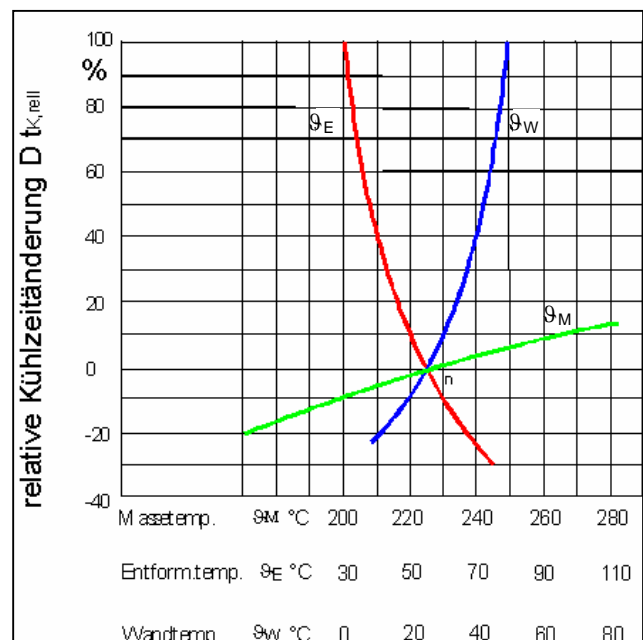


Bild 3: Relative Kühlzeitänderung bei Änderung der Masse-, Wand- und Entformungstemperatur [12]

3. Wärmeströme im Spritzgießwerkzeug

Bild 4 stellt beispielhaft Wärmeströme in einem Spritzgießwerkzeug dar. Die durch die Kunststoffmasse eingebrachte Wärme wird in diesem Fall durch Leitung an die Aufspannplatten sowie durch Strahlung und Konvektion an die Umgebung abgegeben. Um ein Gleichgewicht zwischen eingebrachter und abgeführter Wärme zu bekommen, muß die restliche Wärme durch ein Kühlmedium abgeführt werden. In anderen Fällen kann auch Wärme aus der Umgebung oder muss vom Temperiergeräten dem Spritzgießwerkzeug zugeführt werden.

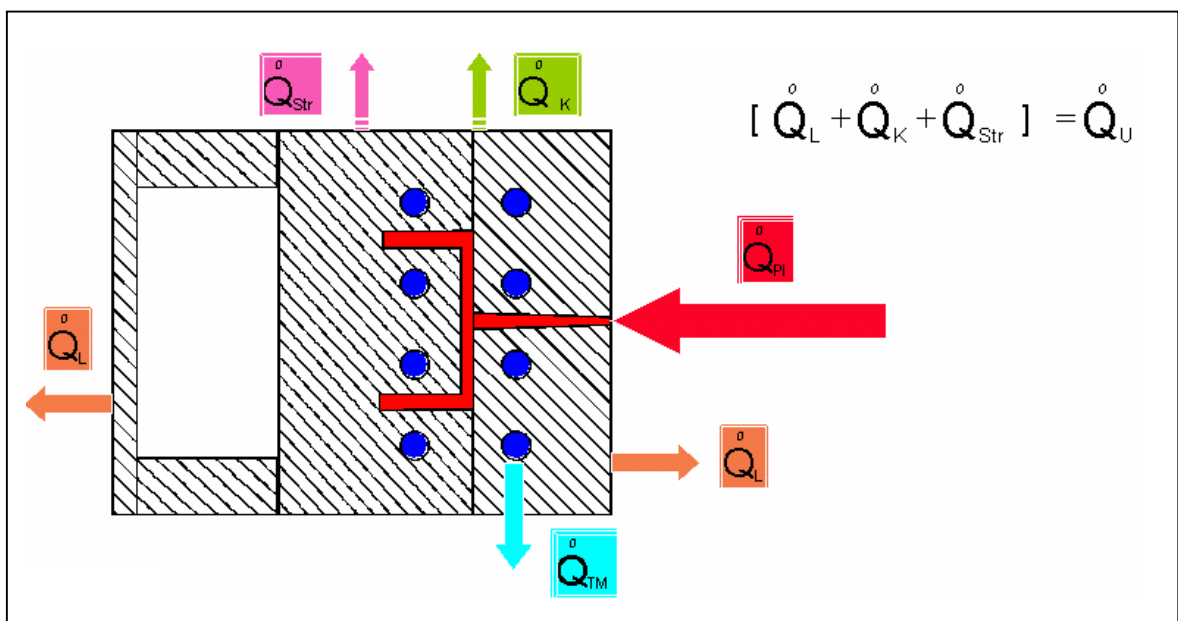


Bild 4: Bilanz der Wärmeströme am Werkzeug [4,9]

4. Der Temperierfehler

Durch die Lage der Temperierkanäle zueinander und zur Werkzeugwand ergibt sich an der Formnestwand ein wellenförmiges Temperaturprofil mit einer mehr oder weniger großen Temperaturdifferenz an der Formnestwand (Bild 5).

Der Temperierfehler hat nichts mit der physikalisch bedingten Temperaturschwankung an der Formnestoberfläche während des Zyklus zu tun.

Die Formteilbereiche, die zwischen den Temperierkanälen liegen, werden schlechter gekühlt als die Bereiche, die dem Temperierkanal gegenüber liegen.

Der Temperierfehler sollte aus Homogenitätsgründen für

teilkristalline Thermoplaste 5 % und für amorphe Thermoplaste 10 % nicht überschreiten.

Die unten aufgeführten Maße haben sich für eine gleichmäßige Werkzeugtemperierung von flächigen Formteilen als zweckmäßig erwiesen. Besser ist jedoch eine genaue Berechnung der Abstände.

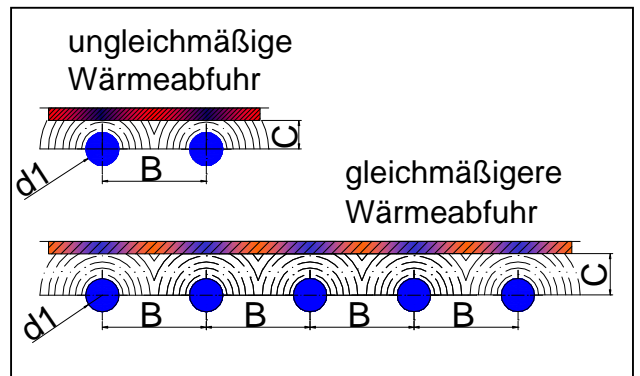


Bild 5: Wärmeabfuhr an den Temperierkanälen [1,12]

Wanddicke des Spritzgußteils (mm)	Abstand Bohrungsmitte zum Spritzgußteil C (mm)	Bohrungsmitten-Abstand B (mm)	Bohrungsdurchmesser d_1 (mm)
0,0 bis 1,0	11 bis 15	10 bis 13	4 bis 6
1,0 bis 2,0	15 bis 21	13 bis 19	6 bis 8
2,0 bis 4,0	21 bis 27	19 bis 23	8 bis 11
4,0 bis 6,0	27 bis 35	23 bis 30	11 bis 14
6,0 bis 8,0	35 bis 50	30 bis 40	14 bis 18

5. Kerntemperierungen

Im Gegensatz zur Kühlung von flächigen Formteilen, bei denen durch die gezeigte Kombination aus Lage und Durchmesser der Kühlbohrungen eine gleichmäßige Temperierung erfolgen kann, besteht bei der Temperierung von Kernen mit geringem Durchmesser das Problem, die Wärme überhaupt auf geeignete Weise abzuführen. Bild 6 zeigt einige Möglichkeiten Kerne zu temperieren.

Die Formmasse schwindet nach dem Einspritzen in fast allen Fällen auf den Kern und erzielt somit auch eine direkte Wärmerübertragung auf den Kern. Zwischen Formmasse und Gesenk entsteht ein Spalt, durch den die Wärme schlechter abgeleitet wird. Die größte Wärmemenge wird somit auf den Kern übertragen. Wird der Kern nicht ausreichend temperiert, kann er sich soweit aufheizen, daß die Formmasse beim Entformen darauf hängen bleibt.

Besondere Möglichkeiten, Kerne zu temperieren, bietet die Vakuumlöstechnik und die CO₂-Temperierung.


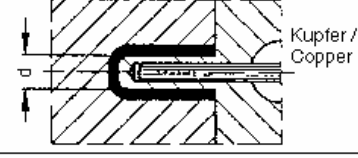
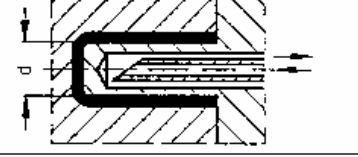
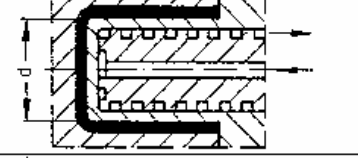

Kerndurchmesser Kernbreite / Core diameter core width d (mm)	Beschreibung / Description	Konstruktion / Design
iv 3	Wärmeabfuhr durch Luft bei geöffnetem Werkzeug / Heat elimination by air with open mould	 Luft / Air
iv 5	Kupfer oder Wärmeleitrohr als Wärmeleiter zum Temperiermedium / Copper or thermally conductive pipe to conduct heat to the heating/cooling medium	 Kupfer / Copper
iv 8	Fingertemperierung / Long slender heating	
iv 40	Wendeltemperierung / Spiral heating/cooling channel	
Rohrkern / Pipe core s ≥ 4	Temperierung bei Rohrkern durch zweigängige Wendel / Heating/cooling for pipe core with a double flighted spiral	

Bild 6: Konventionelle Möglichkeiten der Kerntemperierung [1]

6. Probleme der Wassertemperierung

Bei dem Einsatz von herkömmlichen Wassertemperierungen können folgende Probleme entstehen:

- Eine wirkungsvolle Kühlung wird durch den "Platzbedarf" im Werkzeug eingeschränkt.
Die Kühlung wird dort angebracht wo Platz ist, nicht dort, wo sie am effektivsten ist.
- Enge Kerne werden oft nicht temperiert; die Wanddicken des Formteiles in diesen Bereichen sind oft Zykluszeitbestimmend.
- Ablagerungen bei Verwendung von Kühlwasser können sich bilden.
- Ungleichmäßige Temperaturen an der Formteiloberfläche beeinflussen die Qualität und Wirtschaftlichkeit.

7. Die CO₂- Temperierung

Die CO₂- Temperierung ist eine ergänzende Kühlung zur Wassertemperierung.

Sie kann sowohl in Verbindung mit einem Sinterstahl, als auch im konventionellen Stahl angewendet werden.

In beiden Fällen wird das CO₂ über immer kleiner werdende Leitungsdurchmesser bis zum Expansionsraum flüssig gehalten, bis es aus dem Kapillarrohr austritt und im Expansionsraum verdampft (Bild 7). Durch die Verdampfung können Temperaturen von theoretisch -78,9 °C entstehen.

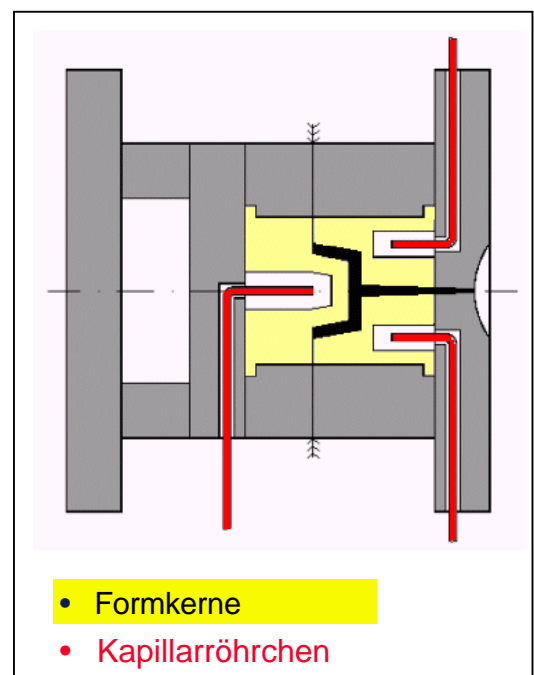


Bild 7: Schematische CO₂-Temperierung [5,6]

7.1 Die Kühlwirkung

Die niedrige Temperatur des Gases von ca. -78°C wird durch den Unterschied des Energiehaushaltes (Enthalpie) zwischen der flüssigen und der gasförmigen Phase erreicht. Flüssiges CO_2 gelangt in den Expansionsraum, wo es durch den Druckabfall (Expansion) verdampft. Für diese Verdampfung benötigt das CO_2 Energie, die es sich in Form von Wärme aus der Umgebung nimmt.

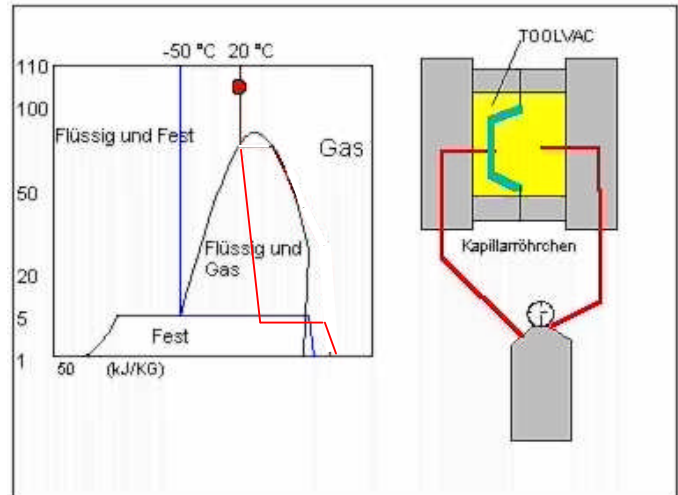


Bild 8: Der Verlauf im Druck-Enthalpie (p,h)-Diagramm für CO_2 [8,6]

Das oben dargestellte Diagramm (Bild 8) zeigt den physikalischen Zusammenhang von Temperatur, Druck und Enthalpie. Die Enthalpie des gasförmigen CO_2 ist sehr viel größer als die des flüssigen CO_2 . Das bedeutet, daß Energie in Form von Wärme beim Übergang von der flüssigen in die gasförmige Phase aufgenommen wird.

7.2 Vorteile der CO_2 -Temperierung

Durch die CO_2 -Temperierung ergeben sich folgende Vorteile:

- Gleichmäßigere Temperaturen am Formteil
- Engste Bereiche im Werkzeug können temperiert werden
- Die Flexibilität der Kapillarröhrchen, sowie die kleinen Durchmesser von nur 1,6 mm.
- Separate Temperierung dickwandiger Bereiche möglich
- Kürzere Zykluszeiten und damit höhere Produktivität
- Verwendung der CO_2 -Temperierung mit konventionellen Einsatzstählen
- Es wurden Kühlzeiteinsparungen an Praxiswerkzeugen von bis zu 60% erreicht

7.3 Anwendung bei konventionellem Stahl

Bei der Temperierung im konventionellen Stahl wird das CO_2 ebenfalls in ein Expansionsraum geleitet und verdampft (Bild 12). Jedoch kann das CO_2 nicht durch den Stahl strömen und hat somit nur die Oberfläche des Expansionsraumes zur Wärmeübertragung.

Vorteile gegenüber einem Sinterstahl:

- konventioneller Stahl kann höhere Biegespannungen aufnehmen.
- Nachträgliches Einbringen der CO_2 -Temperierung.

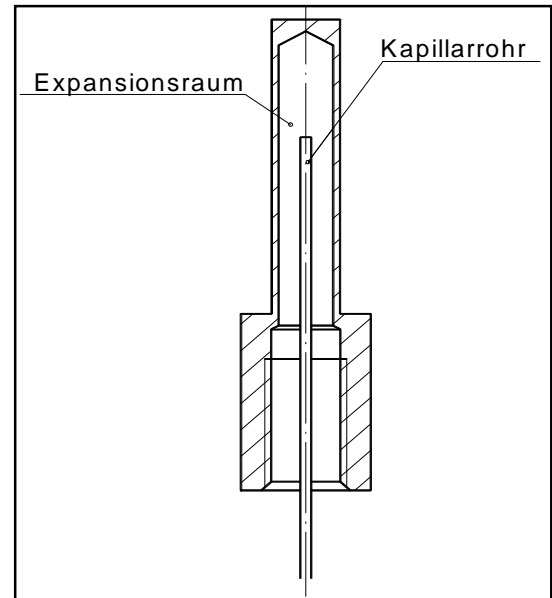


Bild 12: Versuchskern [6]

Temperieren von kleinen Formkernen

Für die spezielle Temperierung kleiner Kerne (Bild 12) ist die CO_2 -Temperierung mit konventionellem Stahl geeignet. Hierbei expandiert das CO_2 im Expansionsraum, wobei der Wärmeentzug über die Wärmeleitung des Stahls bis an das Formteil geführt wird. Die nachfolgenden Bilder (Bild 13) zeigen rechts eine gleichmäßige Kerntemperierung und links eine ungleichmäßige Kerntemperierung. Diese Temperaturunterschiede können durch die Lage der Kapillarröhrchen und die Gestaltung des Expansionsraumes auftreten. Hierzu wurden Untersuchungen gemacht, die die Lage des Kapillarrohres bei bestimmten Expansionsraumdurchmessern aufzeigen.

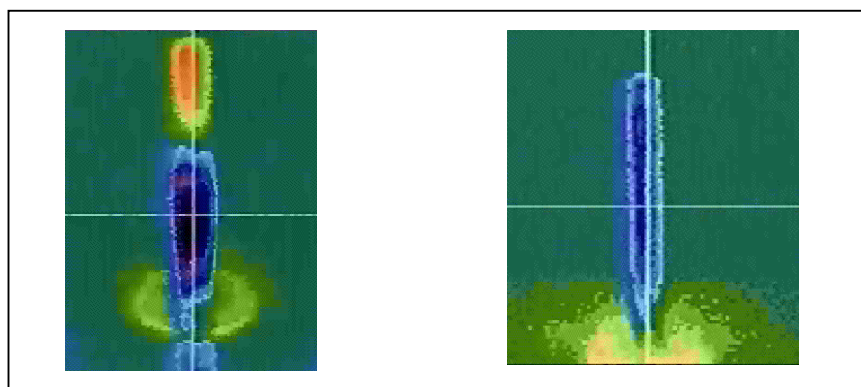


Bild 13: Die Temperaturverteilung bei der Kühlung kleiner Kerne (50mm Länge) mit CO_2 [6]

7.6 Beispiel Praxiswerkzeug langer Kern

Nachfolgend wird am Beispiel eines langen Kernes (Bild 14) die CO₂ –Temperierung und deren Ergebnisse vorgestellt.

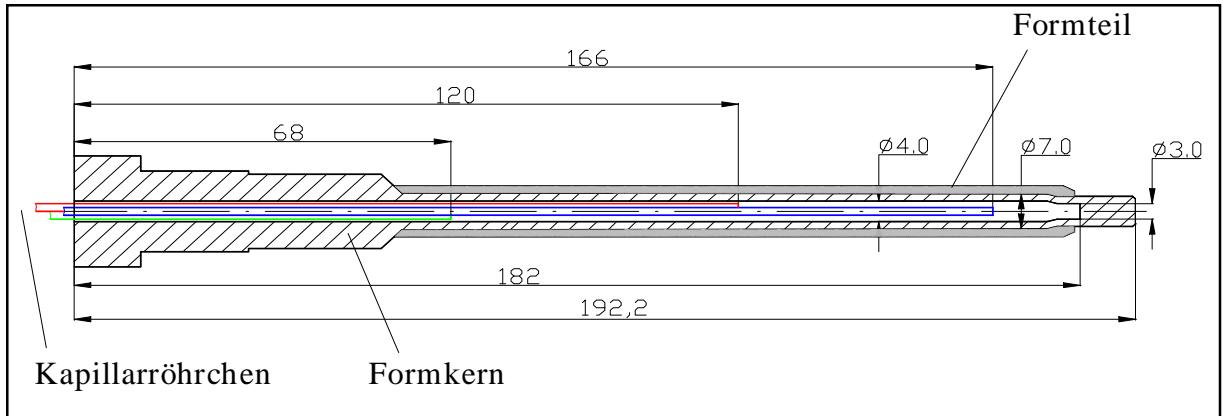


Bild 14: Positionieren der Kapillarröhrchen [6]

Bei langen Kernen müssen für eine gleichmäßige Temperaturverteilung mehrere Kapillarröhrchen über die Länge verteilt angebracht werden.

Die Temperaturverteilung

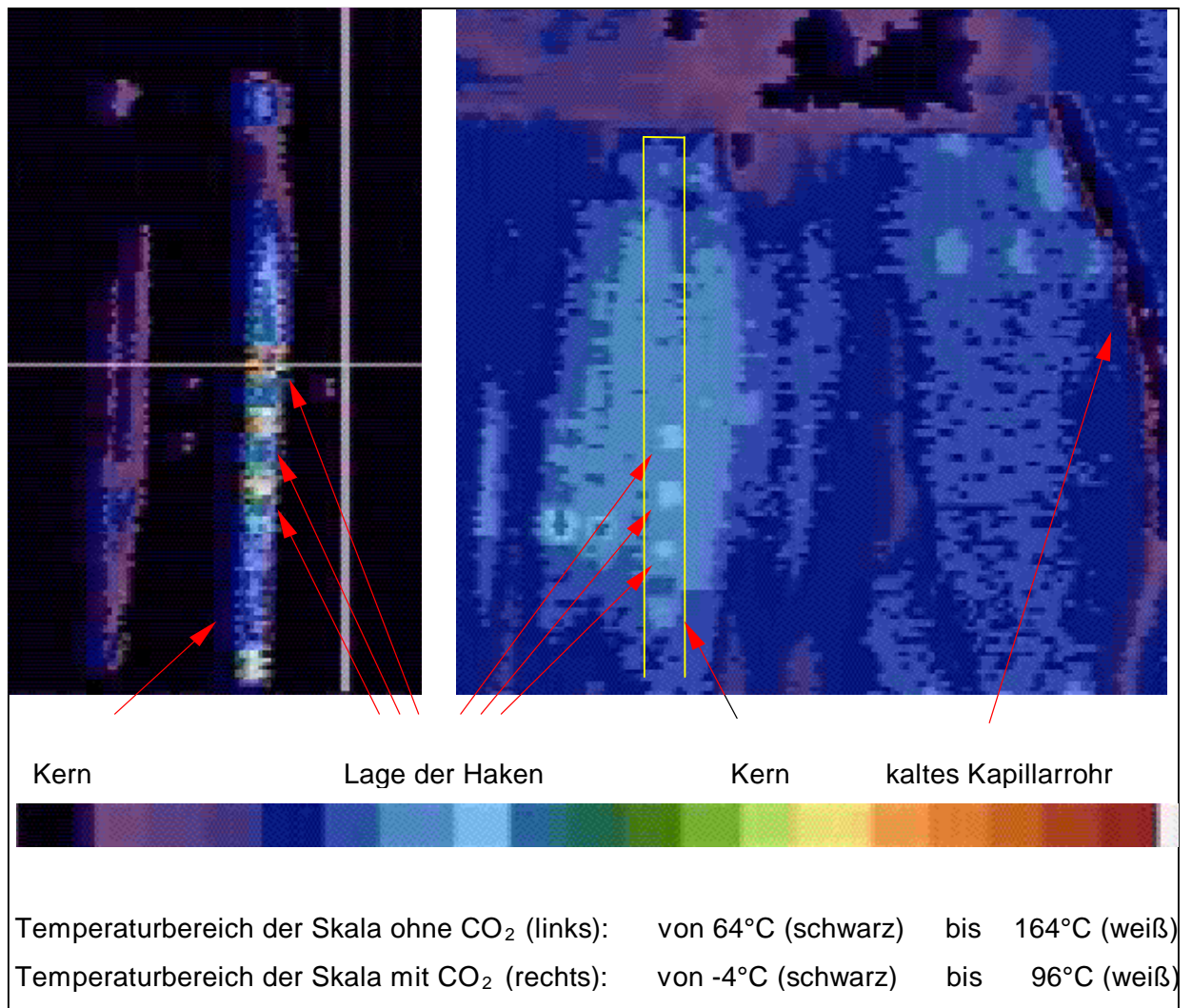


Bild 15: Aufnahmen mit der Wärmebildkamera direkt nach der Entformung [6]

Die Aufnahme mit der Wärmebildkamera (Bild 15) zeigt, dass mit der CO₂-Temperierung (rechtes Bild) die Kerntemperatur direkt nach dem Entformen, gleich der übrigen Werkzeugtemperatur ist (ca. 40°C). Ohne die CO₂-Temperierung (linkes Bild) hat der Kern wesentlich höhere Temperaturen (ca. 120°C).

Die Gaszufuhr

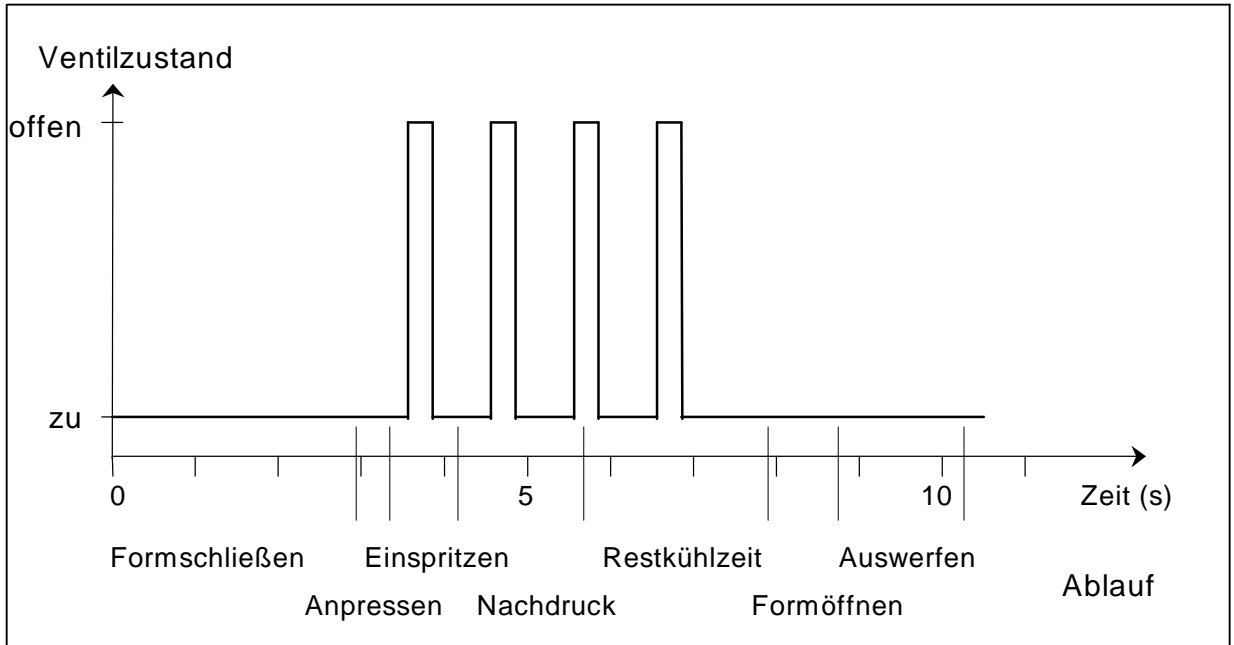


Bild 16: Beispiel für das Steuern der Impulse [6]

Um die gewünschte Werkzeugwandtemperatur mit der CO₂-Temperierung zu erreichen, strömt das CO₂ pulsierend in den Expansionsraum ein (Bild 16). Das Einströmen ist nur während der Kühlzeit nötig.

Vergleich der Zykluszeiten

	konventionelle Kühlung	zusätzliche CO ₂ -Kühlung
Formschließen	2,80 s	2,80 s
Anpressen	0,40 s	0,40 s
Einspritzen	0,84 s	0,84 s
Nachdruck	1,52 s	1,52 s
Restkühlzeit	8,02 s	2,22 s
Formöffnen	0,84 s	0,84 s
Auswerfen	1,50 s	1,50 s
Gesamtzeit	15,92 s	10,12 s

Bild 17: Vergleich der Maschinenzeiten mit und ohne der CO₂-Temperierung [6]

Zykluszeiteinsparung

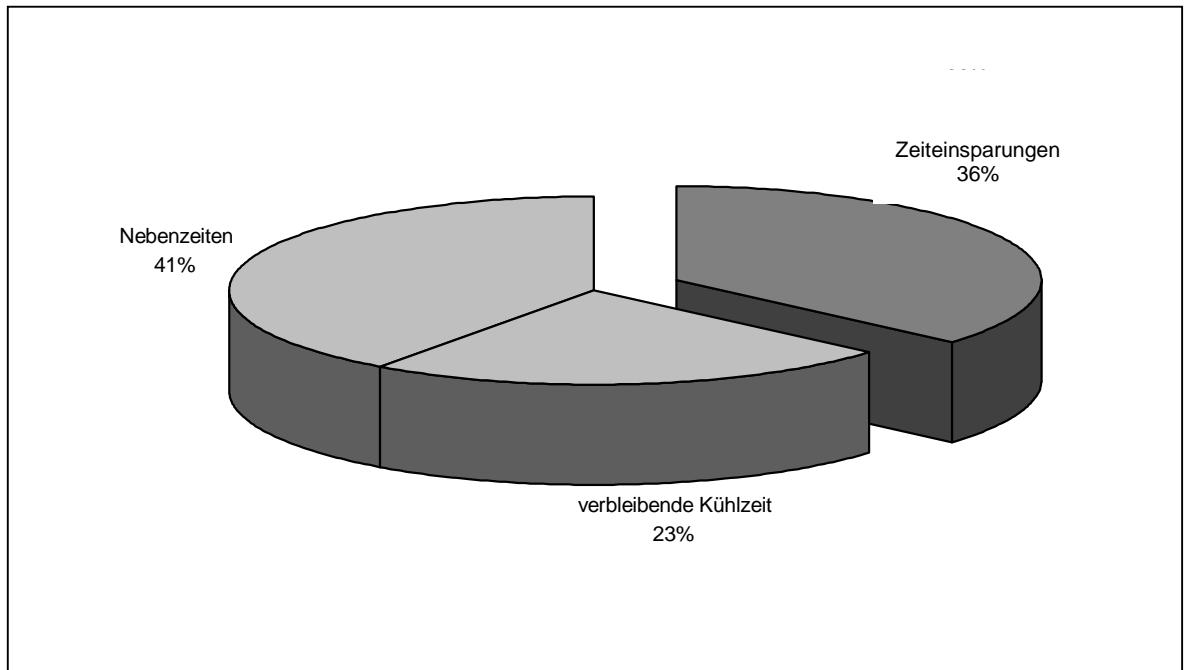


Bild 18: Zykluszeiteinsparungen beim Temperieren des langen Kerns mit CO₂ gegenüber der Temperierung ohne CO₂ [6]

Durch die CO₂-Temperierung ergab sich gegenüber der Temperierung ohne CO₂ eine Zykluszeiteinsparung von 36% (Bild 18). Wird nur die Kühlzeit betrachtet, so wurde hier sogar eine Einsparung von ca. 60% erreicht (Bild 17).

7.7 Beispiel Praxiswerkzeug langer, dünner Steg

Bei dem in Bild 19 gezeigten Scheinwerfergehäuse liegt das Temperaturproblem im langen dünnen Kern, der den mittleren Steg ausformt.

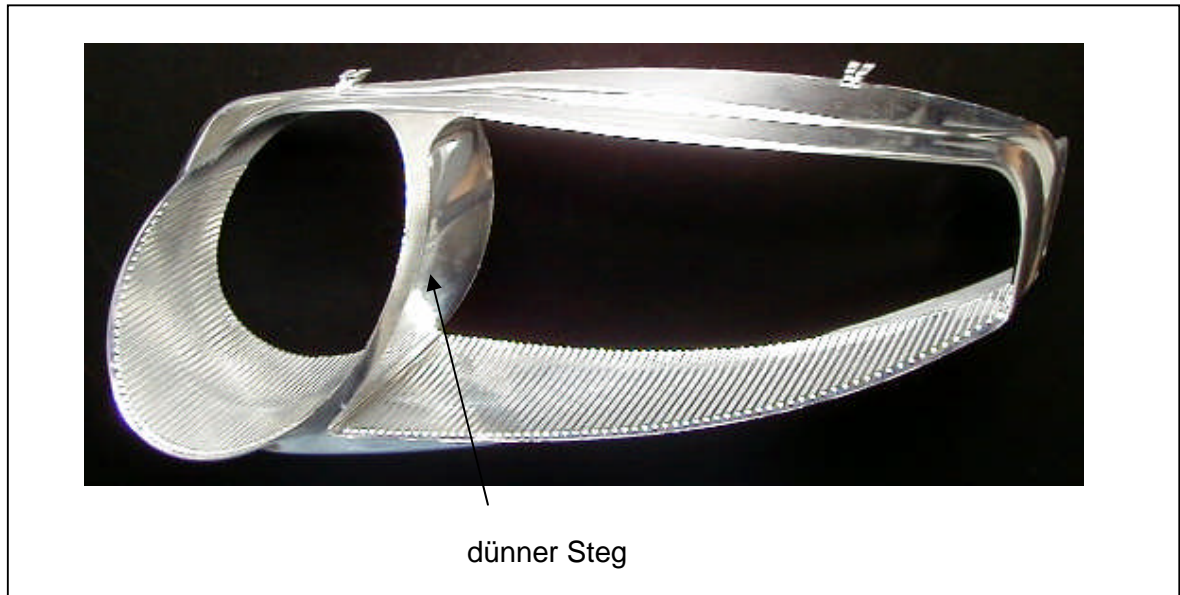


Bild 19: Scheinwerfergehäuse

Um die Wärme der schon blau angelaufenen Kerne (Bild 20) abführen zu können, wurden in jedem Steg 6 Kapillarröhrchen angebracht.

Durch die eingebrachte CO₂ – Temperierung konnten nun Temperaturen am Kern erreicht werden, die gleich der übrigen Temperaturen im Werkzeug sind.

Somit wurden Zykluszeiteinsparungen von 18 Sekunden erzielt, sowie eine Kühlzeit erreicht, die der theoretisch möglichen von 15s sehr nahe kommt.



Bild 20: Sicht ins Formnest

7.8 Beispiel Praxiswerkzeug mit Materialanhäufung

Ein weiterer Einsatz der CO₂-Temperierung in konventionellem Stahl kann die Kühlung der Materialanhäufungen an einem Gasinnendruck Formteil sein (Bild 21). Bedingt durch die Ausbildung der Gasblase entstehen an den Formteilenden Materialanhäufungen, die partiell mit der CO₂-Temperierung gekühlt werden können. Wenn sich bei einer konventionellen Kühlung dann noch kleine Schieber in den Bereichen der Materialanhäufung befinden (Bild 21 und 22), werden sehr hohe Kühlzeiten benötigt, um die Wärme abzuführen.

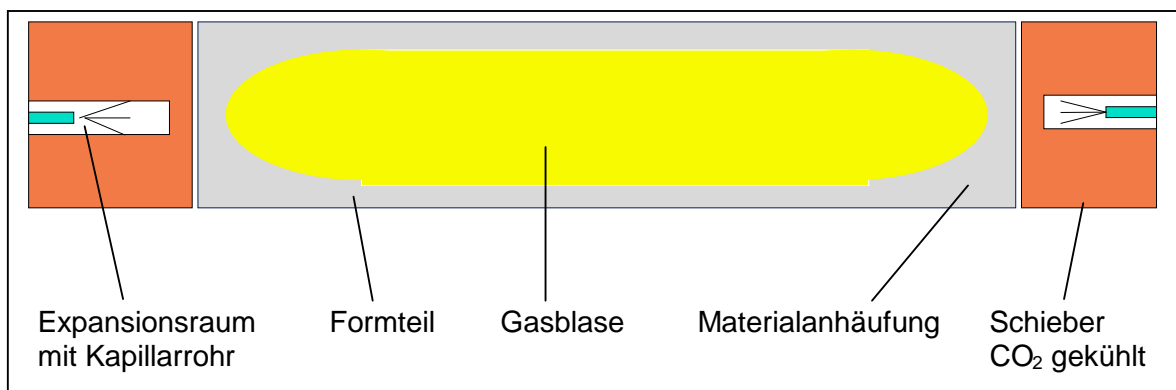


Bild 21: Schematische Darstellung des Gasinnendruckteils [6]

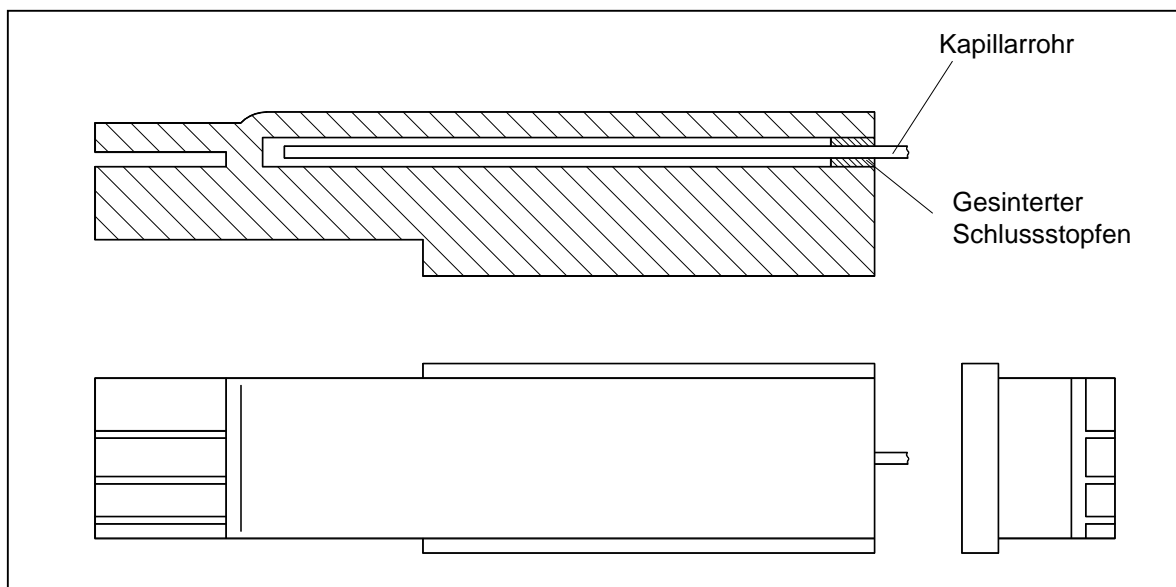


Bild 22: Vereinfachte Darstellung des Schiebers [6]

Bei den Versuchen wurde nur eine einfache Bohrung eingebracht (Bild 22). Weitere Optimierungen sind jedoch noch möglich, z.B. den Expansionsraum flächiger gestalten und der Kontur besser folgen.

Zykluszeiteinsparung

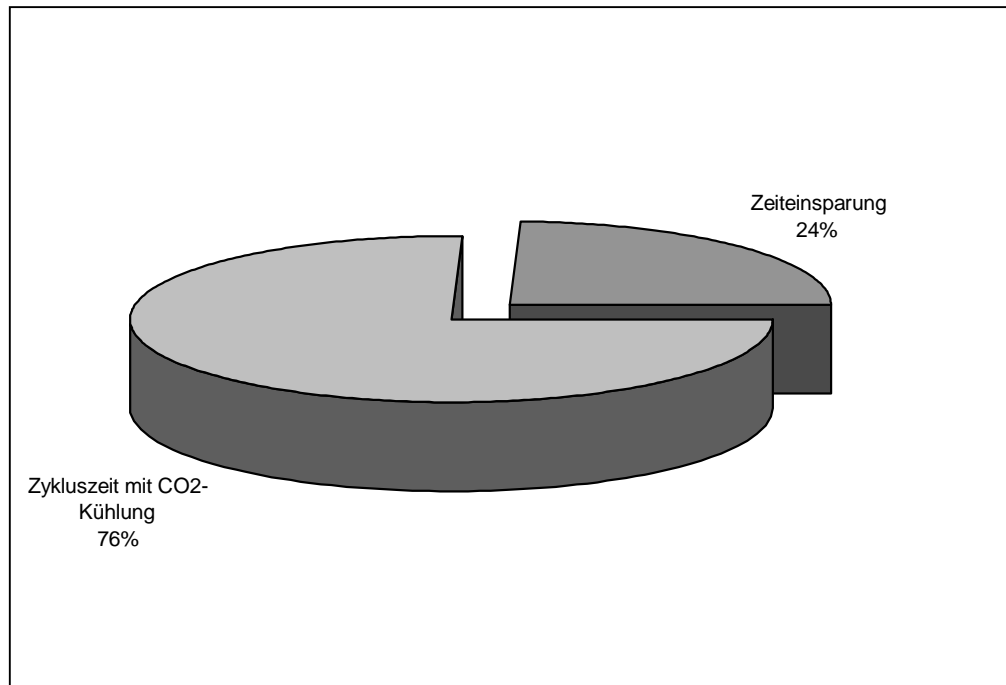


Bild 23: Zykluszeiteinsparung des Gasinnendruckteils mit der zusätzlichen CO₂-Temperierung [6]

Nur durch den Einsatz der CO₂ – Temperierung wurden Zykluszeiteinsparungen von 24% erzielt (Bild 23), ohne eine weitere Optimierung der CO₂ – Temperierung durchgeführt zu haben.

Kosteneinsparung

Durch den Einsatz der CO₂-Temperierung und die daraus resultierende Zykluszeiteinsparung (Bild 24) wurde nach den Angaben des Herstellers eine zu erwartende Kosteneinsparung von ca. 14% gegenüber der konventionellen Lösung berechnet.

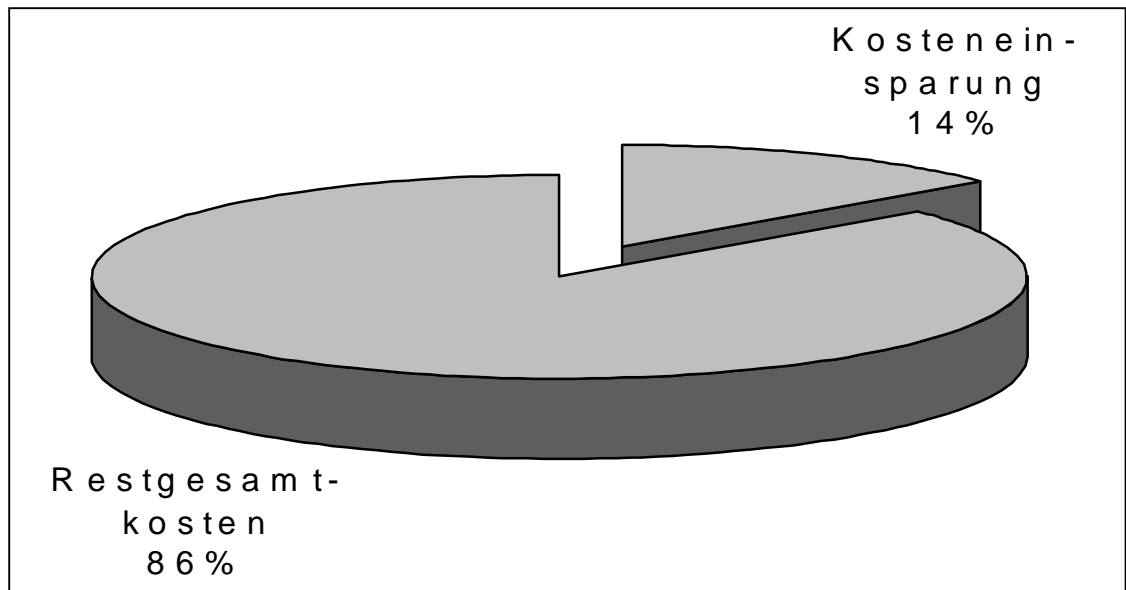


Bild 24: Zu erwartende Kosteneinsparungen des Gasinnendruckteils mit Hilfe der CO₂-Temperierung [6]

Folgende Faktoren haben einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der Kosteneinsparung.

- Jahresproduktion der Formteile
- CO₂ Einsatz pro Zyklus
- Zykluszeiteinsparung
- Maschinenstundensatz
- Höhe der Werkzeugkosten

Kostenrechnung

		Konventionelles Werkzeug	CO ₂ -Temperierung
Grunddaten		€	€
Kunststoff-Kosten	€/ kg	0,77	0,77
Teilegewicht	g	43,00	43,00
Zykluszeit	s	45,00	34,00
Anzahl Kavitäten		2	2
Anzahl Teile	/Minute	3	4
Anzahl Teile	/Stunde	160	212
Prod.Stunden	h/Jahr	10.000	10.000
Auslastung	%	100	100
tats. Prod.Stunden	h/Jahr	10.000	10.000
Anzahl Teile	/Jahr	1.600.000	2.117.647
CO ₂ -Einsatz	g/Teil		40,000
CO ₂ -Kosten	€/ kg		0,24
Fixe Kosten			
Abschreibung	Jahre	4,00	
Werkzeug-Invest inkl. Lizenz	€	30.677,51	33.700,10
Steuergerät	€		153,39
Tankmiete	€/Monat		357,90
Montage, Rohrleitungen, Fundament	€		4.090,34
Summe, fixe Kosten	€	30.677,51	38.301,73
Fixe Kosten/Stunde			
Maschinenkosten	€/h	30,68	30,68
Werkzeug-Invest	€/h	0,77	0,84
Steuergerät	€/h		0,00
Tankmiete	€/h		0,04
Montage, Rohrleitungen	€/h		0,10
Summe, fixe Kosten	€/h	31,45	31,66
Fixe Kosten/Teil			
Summe, fixe Kosten	€/Teil	0,20	0,15
Variable Kosten/Teil			
Kunststoff-Kosten	€/Teil	0,03	0,03
CO ₂ -Kosten	€/Teil		0,01
Lizenz	€/Kg Co2		-
Lizenz	€/Teil		-
Summe, var. Kosten	€/Teil	0,03	0,04
Summe Teilkosten		0,23	0,19

7.9 Erforderliche Anlage

1. Gasbehälter (Gastank, Flaschenbündel oder Gasflasche)
2. Evtl. Überdruckventil und Manometer.
3. Verteilerblock mit Ventilen.
4. Zuleitungen, Kapillarröhrchen.
5. Verlegen der Kapillarröhrchen.
6. Evtl. Steuergerät.

Eine oder mehrere verbundene Flaschen sind für Jahresmengen kleiner 3 Tonnen gedacht. Flaschenbündel (Bild 25) sind für einen CO₂- Verbrauch kleiner 10 Tonnen pro Jahr geeignet. Beide Versorgungsverfahren funktionieren nur bei Raumtemperaturen bis 30°C. Sie werden in der Nähe der Spritzgießmaschine platziert.

Bei Jahresmengen über 10 Tonnen sollte ein Tank installiert werden, der auch unabhängig von den Außentemperaturen funktioniert.

Die Dosierung wird über die Steuerung von Magnetventilen erreicht, die an die Werkzeugaußenseite montiert werden (Bild 26). Die Magnetventile bekommen das CO₂ über einen Hochdruckschlauch, der es über die flexiblen Kapillarröhrchen bis zum Expansionsraum leitet.

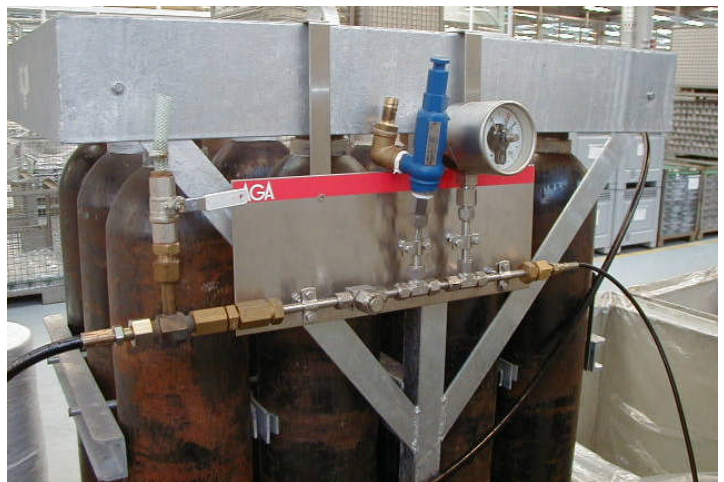


Bild 25: Flaschenbündel

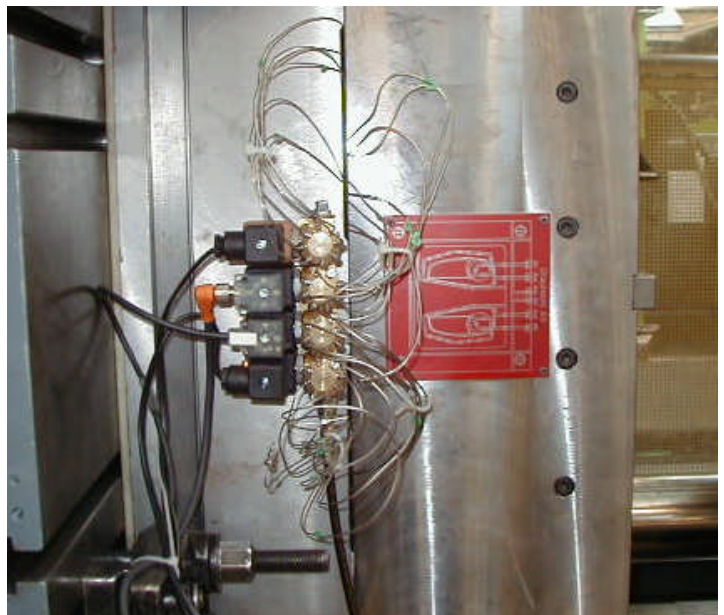


Bild 26: Ventile, Verteilerblock und Kapillarröhrchen am Werkzeug

Literaturverzeichnis

- [1] Zöllner, O. „Thermische Werkzeugauslegung“
Anwendungstechnische Information ATI 892,
Bayer AG, Leverkusen, Februar 1993
- [2] Wübken, G. „Thermisches Verhalten und thermische Auslegung von
Spritzgießwerkzeugen“
Herausgeber: Institut für Kunststoffverarbeitung an der
RWTH Aachen, Juni 1976
- [3] Schürmann, E. „Abschätzmethoden für die Auslegung von
Spritzgießwerkzeugen“
Dissertation an der RWTH Aachen, 1979
- [4] Wübken, G. „Einfluß der Verarbeitungsbedingungen auf die innere
Struktur thermoplastischer Spritzgußteile unter
besonderer Berücksichtigung der Abkühlverhältnisse“
Dissertation an der RWTH Aachen, 1974
- [5] n.n. Technisches Handbuch Toolvac, Fa. AGA GAS GmbH,
1995
- [6] Berghoff, M. „Kühlen kritischer Bereiche im Werkzeug mittels CO₂-
Temperierung“ Diplomarbeit an der Märkischen
Fachhochschule Iserlohn, 1999
Betreuung: Prof. Dr.-Ing. P. Thienel
- [7] Thienel, P. Innovative Werkzeugtemperierung
- [8] n.n. „Sonderverfahren der Spritzgießtechnik“ CD des
Kunststoffverarbeitungslabor (KVL 1) der Märkischen
Fachhochschule Iserlohn und Hagen
- [9] Kürten A. „Thermische Werkzeugauslegung“
Iserlohner Kunststoff-Technologie GmbH
- [10] Thienel, P. „Der Formfüllvorgang beim Spritzgießen von
Thermoplasten“ Dissertation an der RWTH Aachen, 1977
- [11] Thienel, P. / Hoster, B. Informationsblatt des KVL 1 der Märkischen
Fachhochschule Iserlohn und Hagen
- [12] Thienel P. Vorlesungsunterlagen „Werkzeuge für Kunststoffe“ an der
Märkischen Fachhochschule Iserlohn und Hagen, 1998