Temperierung von Druckgießformen - eine kritische Betrachtung der Heiz- und Kühlleistungen von Temperiergeräten

Effect of temperature control channels on preheating and temperature control of high pressure die casting dies

Autoren:

Dipl.-Ing. Horst Rockenschaub: Leiter der Versuchsgießerei am Österreichischen Gießerei-Institut in Leoben

Ing. Reinhold Gschwandtner: Betriebsassistent am Österreichischen Gießerei-Institut in Leoben, verantwortlich für die Arbeitsgruppen Wärmebehandlung sowie Mess- und Regeltechnik

Ing. Rainer Strohmaier: Verkaufsleiter, Technische Beratung und Kundendienst bei Fa. Robamat Automatisierungstechnik GmbH, Gmunden

Ing. Erich Zeitelhuber: Leiter Konstruktion und Neuentwicklung bei Fa. Robamat Automatisierungstechnik GmbH, Gmunden

Einleitung: Allgemeines zur Formenvorwärmung und Formentemperierung

Jede Druckgießform sollte vor Produktionsbeginn auf eine Betriebstemperatur erwärmt werden, die der für den Gießbetrieb erforderlichen mittleren Formtemperatur entspricht. Im Allgemeinen gilt, dass die Formenstandzeit verlängert wird bzw. die Form am besten geschont wird, wenn der Temperaturunterschied zwischen Gieß- und Formtemperatur möglichst gering ist. Ein Druckgießen mit einer kalten oder ungenügend vorgewärmten Form führt zu hohen Spannungen in der Werkzeugoberfläche. Die Höhe dieser Spannungen wird in erster Linie durch die sich einstellende, instationäre Temperaturverteilung bestimmt. Die Ursache für die Ausbildung einer instationären Verteilung sind hohe Temperaturdifferenzen zwischen metallbeaufschlagter Formwand und dem Werkzeugkern [1]. Eine Optimierung der Formtemperaturen sowohl hinsichtlich gleichmäßiger Temperaturverteilung als auch Spitzentemperatur an der Oberfläche kann die frühzeitige Schädigung des

Werkzeuges, vor allem in Form von Brandrissbildung, verzögern und erhöht somit signifikant die Standzeit der Form.

Bei der Produktion von Aluminium-Druckgussteilen spielt der Wärmehaushalt der Druckgießform zudem eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Teilequalität und der Zykluszeit. Sowohl für die Formfüllung als auch Erstarrung des Gussteiles ist die, sich im quasistationären Betriebszustand einstellende, mittlere Formtemperatur von entscheidender Bedeutung. In Bereichen, wo eine hohe Gussqualität gefordert wird, stellen die Form- als auch die Formwandtemperatur primäre Qualitätskriterien für die Druckgussteile dar.

Beim Druckgießen übernimmt die Formtemperierung mit Temperiergeräten die Aufgaben des Aufheizens und des Haltens der Form auf Betriebstemperatur, wobei Letzteres sowohl das Heizen als auch das Kühlen der Form einschließt (vielfach wird daher auch die Bezeichnung Heiz-Kühl-Geräte für Temperiergeräte verwendet). Die Kenntnis und die Beherrschung der thermischen Vorgänge in der Form sind daher wichtige Faktoren zur Erreichung einer gleichmäßig hohen Qualität der Druckgussteile sowie zur Erzielung von hohen Formenstandzeiten.

Einschränkungen in der Konzeption der Temperierkanäle

Die Auslegung der Temperierkanäle einer Druckgießform unterliegt in vielen Fällen den Beschränkungen durch die Geometrie der Gussteile. So können aufgrund der teilweise tief auszubildenden Kavitäten, der Aufteilung in Formnestern, der Notwendigkeit von Formteilungssprüngen sowie den in der Form vorhandenen Kernen und Schiebern und vielen anderen Zwängen die Temperierkanäle nicht immer optimal in ihrem Verlauf, ihren Querschnitten und der Länge und Lage in der Tiefe des Werkzeuges ausgebildet werden. In Fällen, wo die Form über keine ausreichende Dimensionierung dieser „inneren“ Temperierung verfügt, treten ungenügende Vorwärmtemperaturen bzw. eine zu geringe Kühlwirkung auf das Gussteil auf. Es ist nachvollziehbar, dass in der betrieblichen Praxis, aufgrund ungenügender Dimensionierung bzw. mangelnder Information über die thermische Konzeption der Form, vielfach die praktischen Heiz-/Kühlleistungen der Temperiergeräte im Vergleich zu ihren Nennleistungen bemängelt werden. Die

vorliegende Untersuchung versucht einen kausalen Zusammenhang einer ungenügenden Temperierkanalauslegung bei Verwendung unterschiedlicher Temperiergeräte auf die Form- und Formwandtemperaturen herzustellen.

Überschlägige Betrachtung des Wärmehaushaltes einer Druckgießform

Beim Druckgießen wird die flüssige Schmelze mit hohen Geschwindigkeiten in die Form eingebracht. Das Werkzeug hat dabei die Aufgabe, die Kontur exakt wiederzugeben und durch Wärmeentzug die Erstarrung einzuleiten. Die während der Erstarrung frei werdende Kristallisationswärme (latente Wärme) wird in die Druckgießform abgeleitet bzw. wird das Gussteil danach in der Form so weit abgekühlt, bis eine problemlose Entformung (Auswerfen) mit nachfolgendem, geringem Verzug möglich ist. Dies setzt eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung im Gussteil nach dem Auswerfen voraus, die sich in hohem Maße auch aus der Temperaturverteilung des Werkzeuges ergibt [2].

Die Form hat somit eine beträchtliche Wärmemenge aufzunehmen und abzuleiten, damit die Schmelze in der gewünschten Weise erstarrt und abkühlt. Der Wärmehaushalt einer Druckgießform lässt sich unter der Voraussetzung eines quasistationären Betriebszustandes daher vereinfacht wie folgt beschreiben: *Innerhalb eines Zyklus sollte genau jene Wärmemenge an das Druckgießwerkzeug abgegeben werden, welche durch die Schmelze, Erstarrung und Abkühlung des Gussteiles bis zum Entformen in das Werkzeug (in die Form) eingebracht wurde* [3].

Das Druckgießwerkzeug gibt dabei die Wärme durch Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung an die Umgebung ab. Wird das Wärmeangebot größer, so muss über die Druckgießform auch eine bestimmte Wärmemenge - von der Form weg - an das darin zirkulierende Wärmeträgermedium (Wärmeträgeröl oder Wasser) abgegeben werden. Verfügt die Anlage über keine Kühlwasserbatterien, so kann diese Wärmemenge nur in den Temperiergeräten durch Kühlung abgeführt werden. Die prinzipiellen Möglichkeiten des Einbringens bzw. Abführens von Wärme in einem Druckgusswerkzeug sind in **Bild 1** angeführt.

Die Wärmebilanz einer Druckgießform kann schematisch wie in **Bild 2** in einem sogenannten „Sankeydiagramm“ beschrieben werden [4]. Als Grundlage für die

überschlägige Berechnung der Wärmemengen diente ein Aluminium-Druckgussteil (Legierung Al Si9Cu3(Fe)) mit einem Schussgewicht von ca. 2,2 kg und einer Schmelzetemperatur von 670 °C (entspricht einer Gießtemperatur von ca. 620 °C) .

Der Wärmeeintrag erfolgt in diesem Beispiel mit einem Anteil von ca. 89 % überwiegend über die Schmelze, zusätzlich gelangen ca. 10 % über die Heizung und das Wärmeträgeröl (Temperiergerät) in die Form. Die kinetische Energie des Schusses geht zu ca. 1 % in die Bilanz als Wärmeeintrag ein.

Die Wärmeabgabe erfolgt in etwa zu 20 % in Form von Strahlung und zu ca. 20 % in Form von Wärmeleitung und Konvektion vor allem an die Aufspannplatten. Je nach Entformtemperatur (Temperatur beim Auswerfen) wird mehr oder weniger Wärme auch über das Druckgussteil abgeführt. Bei einer angenommenen Entformtemperatur von rd. 270 °C werden so ca. 25 % der Gesamtwärme über das Gussteil ausgetragen. Je nach Kühl- und Sprühkonzept können die Werte in der Wärmebilanz differieren. So werden bei üblichen Pressrest- und Kolbenkühlungsausführungen etwa 4 % der Wärme abgeführt. Über den Sprühprozess werden ca. 6 % der Wärme von der Druckgießform an das auftreffende Wasser-Sprühmittelgemisch abgegeben. Ein relativ hoher Betrag von ca. 25 % wird im Prozess über das Wärmeträgermedium in die Temperiergeräte abgeführt (Kühlung durch die Temperiergeräte).

Kontakttemperatur (Formwandtemperatur) und Formtemperatur

Die Erstarrung von Aluminium-Silizium-Druckguss-Legierungen erfolgt aufgrund der Legierungskomponenten nicht schlagartig, sondern innerhalb eines Erstarrungsintervalles. Art und Geschwindigkeit der Erstarrung bestimmen dabei in hohem Maße das Gefüge und somit die Gussteilqualität. Als Anhaltswert der von einer Schmelze der Legierung Al Si9Cu3(Fe) bis zur Entnahme (Entformtemperatur ca. 270 °C) in die Form überführten Wärmemenge können ca. 700 kJ/kg angenommen werden (**Bild 3**). Wird nun aus der Form weniger als 700 kJ/kg an Wärme abtransportiert, so würde das zu einem übermäßigen Anstieg der Kontakttemperatur (Formwandtemperatur) bzw. Formtemperatur führen. Den Zusammenhang zwischen Formtemperatur, d. h. der eingestellten Vorlauftemperatur

am Temperiergerät, und der Kontakttemperatur in Abhängigkeit der Schmelzetemperatur gibt **Bild 4** wieder.

Um die Spannungen im Werkzeugstahl gering zu halten, sind zugleich ein möglichst geringer Temperaturunterschied innerhalb eines Zyklus und ein möglichst geringer Temperaturgradient im Werkzeug erforderlich. Es ist daher eine möglichst hohe Formtemperatur bei möglichst geringer Formwandtemperatur anzustreben, wobei im Allgemeinen für die Formwandtemperatur die Schmelzetemperatur maßgebend ist (**Bild 5**). Neben diesem primären Einflussfaktor ist die Formwandtemperatur aber auch noch von der Wärmeeindringfähigkeit des Formwerkstoffes und der Schmelze und dem Wärmeübergangskoeffizienten an der Grenzfläche zwischen Schmelze und Formwand abhängig. Die maximale Formwandtemperatur hängt dabei relativ gering von der Formtemperatur vor dem Gießen ab [1]. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich hinsichtlich der Erhöhung der Formenstandzeit die **große Bedeutung der Formenvorwärmtemperatur** mit der Forderung nach Einhaltung einer möglichst hohen Formtemperatur [5]. Eine völlig falsche Vorgehensweise wäre es, eine kalte Form mit der Schmelze warm zu schießen, da daraus extrem hohe Druckspannungen im Werkzeug resultieren und eine Vorschädigung des Werkzeugstahles eintritt [6].

Aufgaben der Formentemperierung

Die Erfahrung zeigt, dass bei korrekter Schmelze- und Prozessführung ein hoher Anteil des Ausschusses auf eine ungenügende oder falsche Formentemperierung zurückzuführen ist, wobei dies gleichermaßen das Heizen als auch das Kühlen der Form betrifft. Die Formtemperierung hat daher die Aufgabe, die fehlerhaften Auswirkungen zwischen zu hohen und/oder zu geringen Form- und Formwandtemperaturen einzuschränken und im Rahmen ihrer Möglichkeiten für eine ausgeglichene Wärmebilanz zu sorgen bzw. diese einzustellen. Die Formtemperatur beeinflusst folgende Faktoren [3]:

- Oberflächengüte
- Schwindung
- Verzug

- Fließ- und Formfüllvermögen
- Zykluszeit

Eine ungenügende Formtemperatur beeinträchtigt somit die Gussteilqualität, die Formenstandzeit, den Trennmittelauftrag und den gesamten kontinuierlichen Prozessablauf. **Tabelle 1** führt die fehlerhaften Auswirkungen von zu hohen oder zu niedrigen Formtemperaturen an.

Aus den Forderungen nach hoher Vorwärmtemperatur und ausgeglichener Wärmebilanz ergeben sich die Hauptaufgaben der Formtemperierung:

- Aufheizen der Form auf Betriebstemperatur (Heizen)
- Halten der Form auf möglichst hoher Betriebstemperatur mit möglichst geringer Formwandtemperatur (durch Kühlen/Heizen)

Daraus folgen die Vorteile der

- Erreichung einer optimalen Zykluszeit
- Standzeitverlängerung der Form
- Sicherung einer gleichmäßigen und hohen Gussteilqualität

Um die optimale Forminnen- und Formwandtemperatur zu erhalten, muss daher die Form über innen liegende Kanäle und das darin zirkulierende Wärmeträgermedium (Öl oder Wasser) beheizt und vor allem gekühlt werden, was über die Temperiergeräte bewerkstelligt wird.

Form- und Formwandtemperaturen, Wärmeaustausch zwischen Druckgussform und Wärmeträger

Das Temperiergerät muss in der Lage sein, durch eine entsprechende Regelung, verbunden mit ausreichender Heiz- und Kühlleistung und auch Pumpenleistung, die Form- und Formwandtemperaturen in engen Grenzen zu halten. Unabdingbar dafür sind sowohl ein geeignetes Wärmeträgermedium mit guten Wärmeübertragungseigenschaften als auch eine korrekte, exakte Konzeption und Auslegung der Temperierkanäle in der Druckgießform. Diese Bedingungen

vorausgesetzt, ist das Temperiergerät dann in der Lage - trotz der Zeitdauer zur Einstellung des neuen Betriebszustandes bei Änderung der Umlauftemperatur - die Form- bzw. Formwandtemperatur ausreichend rasch zu korrigieren.

Eine falsche Dimensionierung oder Anordnung der Temperierkanäle kann zu großen Temperaturgradienten und damit zu hohen Spannungen in der Form führen [7]. Eine gleichmäßige Verteilung ist aber, wie zuvor beschrieben, geometriebedingt (Vertiefungen, Schieber etc.) in vielen Fällen nicht möglich.

Vereinfacht lässt sich die vom Temperiergerät zu- oder abzuführende Wärme P durch Messung der Ein- und Austrittstemperatur des Wärmeträgers an der Druckgießform bei gleichzeitiger Messung der Durchflussmenge nach folgender Gleichung bestimmen: $P = \dot{m}_{WT} \cdot c_{p_{WT}} \cdot (T_A - T_E)$. Die Gesamtwärme P ergibt sich somit als Produkt von $\dot{m}_{WT}$, der Durchflussmenge des Wärmeträgers pro Zeiteinheit, von c_{pWT}, der spezifischen Wärmekapazität des Wärmeträgers und von der Temperaturdifferenz zwischen der Eintrittstemperatur T_E und der Austrittstemperatur T_A des Wärmeträgers an der Druckgießform. Damit die von der Schmelze zugeführte Wärmemenge P_S vom Wärmeträger abgeführt werden kann, muss die Austauschfläche (Temperierkanäle) für die Wärmeübertragung in der Druckgießform ausreichend dimensioniert sein, wobei prinzipiell eine möglichst große Austauschfläche angestrebt werden soll. Zwischen der Austauschfläche A_K und der zugeführten Wärmemenge P_S besteht folgender Zusammenhang: $A_K = \frac{P_S}{\alpha \cdot \Delta T}$, worin mit α die Wärmeübergangszahl des Wärmeträgermediums (bei Öl als Wärmeträger ~ 1000 - 1800 W/(m²·K), bei Wasser ~ 2300 - 3500 W/(m²·K)) und mit ΔT die Temperaturdifferenz zwischen Kavität und Wärmeträger einzusetzen sind.

Für die Lage der Temperierkanäle bei Auslegung mit Öl als Wärmeträger können folgende Erfahrungswerte angegeben werden: Bei einem Kanaldurchmesser D ist ein Mindestabstand E von ca. 1,5 x D von der Formoberfläche einzuhalten bzw. sollten die Abstände zwischen den Kanälen d um 3 bis 5 x D liegen (siehe **Bild 6**). Bei einem Kanaldurchmesser von 12 mm (ca. $^3/_8$-Zoll) gilt also als Daumenregel ein Abstand von der Formoberfläche von E ~ 22 bis 35 mm und ein Abstand von d ~ 35 bis 60 mm zwischen den Kanälen.

Temperaturverlauf an der Formenwand innerhalb eines Zyklus

Die Temperaturen in der Form können lokal sehr unterschiedlich ausfallen und zudem ändern sie sich zeitlich und weitgehend periodisch mit dem Gießzyklus. Die Änderung dieser Oberflächentemperatur innerhalb eines Zyklus ist beispielhaft in **Bild 8** beschrieben und wurde durch F. Klein und H. W. Szimon [8] experimentell gemessen.

Die Ausgangstemperatur entspricht dabei optimalerweise der Vorwärmtemperatur T_m (1). Unmittelbar nach dem Auftreffen der Schmelze auf die Formwand erreicht die Formwandtemperatur ihr Maximum. Danach kühlt die Oberfläche durch den Wärmeentzug bzw. das Ableiten der Wärme in die Form ab (2). Beim Öffnen der Form (3) und dem nachfolgenden Auswerfen des Gussteiles kühlt die Formoberfläche weiter ab bzw. tritt ein größerer Temperaturverlust auch beim Auftreffen des Trennstoff-/Wassergemisches auf die Form auf (4). Nach dem Ausblasen liefert die Form von innen wieder Wärme nach, so dass sich - während der Schließbewegung der Form bzw. in der Wartezeit bis zum nächsten Schuss - die Oberflächentemperatur wieder leicht erhöht (5).

Die von F. Klein et al. durchgeführte Untersuchung beschreibt den Temperatur-Zeitverlauf an der Formoberfläche beim Gießen von Platten aus der Legierung Al Si9Cu3(Fe). Dabei betrug die Oberflächentemperatur unmittelbar vor der Formfüllung 265°C und die maximale Formwandtemperatur 518°C. Beim Verfolgen der thermischen Verhältnisse für ein ebenes Gussstück zeigte sich, dass die maximale Formwandtemperatur nur in geringem Maße von der Formtemperatur vor dem Gießen abhängt.

Im günstigsten Fall müssten das Niveau bzw. Toleranzband dieser sich periodisch ändernden Oberflächentemperaturen über die gesamte Kavität gleich ausfallen, damit immer eine gleich bleibende Qualität der Druckgussteile zu erwarten ist. Dies gilt es einerseits durch die konstruktive Auslegung der Temperierkanäle zu gewährleisten, andererseits hat das Temperiergerät die Aufgabe, die maximale Vorwärmtemperatur T_o bzw. die Vorwärmtemperatur T_m konstant zu halten. Damit

wird gewährleistet, dass das Toleranzband T_o-T_m (wie in **Bild 8** gekennzeichnet) während der Produktion eingehalten wird bzw. wird verhindert, dass diese Temperaturamplitude bei Produktionsunterbrechungen nicht nach oben oder unten abdriftet. Da der überwiegende Anteil der zugeführten Wärme aus der Schmelze stammt, kann bei schlechter Regelung der Temperiergeräte bereits eine kurze Unterbrechung zu einem Absinken der Formtemperatur und damit zu Ausschuss führen.

Bei der Betrachtung der Formtemperaturen ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese eine große Abhängigkeit von der Geometrie des Werkzeuges aufweisen bzw. auch von der Lage der Messung im Werkzeug abhängig sind. Den Verlauf der Formtemperatur in Abhängigkeit des Abstandes von der Formoberfläche stellt **Bild 9** dar. Gemäß der Untersuchungen von F. Klein und H. W. Szimon treten in einem Abstand von 3 mm von der Formoberfläche nur mehr Spitzentemperaturen von 400°C auf, während sich die Temperatur in tiefer gelegenen Bereichen, bei gleichzeitig kleiner Amplitude, um 200°C einpendelt. Im Allgemeinen kann daher nicht von einer Formtemperatur gesprochen werden, sondern nur von einer mittleren Formtemperatur, wobei in diesem Zusammenhang meistens die am Regler des Temperiergerätes eingestellte Vorlauftemperatur gemeint ist bzw. damit auch jene Temperatur, wie sie in der Tiefe und Umgebung der Temperierkanäle im Werkzeugstahl auftritt.

Versuche zur Temperierung von Formnestern

Bei einer Druckgießform für ein Ausgleichswellengehäuse wurde das ursprüngliche Temperierkonzept bewusst verändert (**Bild 10**). Um eine gute Gussqualität zu erhalten, ist eine gute Temperierung der beiden Läufe unbedingte Voraussetzung. Gegenüber der ursprünglichen Konzeption mit zwei Heizkreisläufen wurde nur mehr ein Kreislauf angeschlossen. Der Lauf im rechten Formnest wurde in diesem Fall noch mit hohen Mediumstemperaturen versorgt, während der Lauf im linken Formnest keine ausreichend hohe Formwandtemperatur für eine gute Nachdruckwirkung aufwies (Lauf friert zu). **Bild 10** rechts zeigt die Füllung mit langsamer Füllgeschwindigkeit und die Auswirkung der geringen Formtemperatur im linken Lauf, welcher einfriert, während das rechte Formnest bereits zur Hälfte gefüllt ist. Die Thermografieaufnahmen der Druckgießform (Bild 11) bzw. des Gussteiles

(**Bild 12**) belegen deutlich, welcher Einfluss der Formentemperierung auf die Temperaturverteilung der Form und des Gussteiles besteht. Während sich im rechten Lauf deutlich ein heller Speisungskanal abbildet und damit die Gussqualität in den dickwandigen Bereichen noch entspricht, führt die schnellere Erstarrung durch den kühleren Lauf im linken Formnest zu einer signifikant geringeren Gussqualität.

Versuchsaufbau Vorwärmung und Kühlung

In einem Versuchsaufbau wurden vier unterschiedliche Temperiergeräte hinsichtlich ihrer Heizleistung beim Vorwärmen einer Druckgießform (Motorhalter) bzw. beim anschließenden Kühlen einer Druckgießform verglichen. Beispielhaft ist in **Bild 13** ein Temperiergerät der Firma Robamat Automatisierungstechnik GmbH, Type 5222, dargestellt.

Der Versuchsaufbau besteht aus dem Temperiergerät, den Zuleitungen (nicht isoliert) zur Druckgießform, der Druckgießform mit Formeinsatz (Motorhalter, Schussgewicht 2,2 kg, ausgelegt für eine Legierung Al Si9Cu3(Fe)) und der Messwerterfassung der Temperaturen (**Bild 14**). Der Formeinsatz wurde mit vier Thermoelementen bestückt, die mittels Magnethaltern in der Kavität befestigt wurden und somit die Oberflächentemperatur wiedergeben (**Bild 15**). Es wurden die Vorlauftemperatur des Wärmeträgermediums und dessen Durchflussmenge gemessen sowie die Raumtemperatur und die Temperatur des Kühlwassers aufgezeichnet, wobei die Raumtemperatur einen konstanten Wert um 25°C aufwies und das Kühlwasser bei einer konstanten Temperatur von 15°C lag.

Die Masse des gesamten Formrahmens inklusive des Formeinsatzes betrug 810 kg. Das Werkzeug wurde frei im Raum aufgestellt, um eine weitestgehend ungehinderte Wärmeabstrahlung an die Umgebung zu ermöglichen. Als Wärmeübertragungsmedium wurde bei allen Versuchen ein identes Wärmeträgeröl auf Mineralölbasis verwendet, dessen wichtigste Stoffwerte in **Tabelle 2** aufgelistet sind. Es wurden kalibrierte Mantelthermoelemente (Typ K, Ni-CrNi) mittels Magnethaltern an die Kavität angedrückt, um die Kontakttemperaturen zu erfassen.

Vier unterschiedliche Temperiergeräte mit Nenn-Heiz-/Kühlleistungsangaben von 9/20 kW, 12/160 kW, 10/40 kW und 20/60 kW wurden für die Versuche verwendet

(**Tabelle 3**). Es wurde die Mediumstemperatur geregelt, da dieses Regelungskonzept überwiegend in der betrieblichen Praxis angewendet wird. Der Temperaturfühler befindet sich dabei im Vorlauf des Temperiergerätes. Da der Wärmeaustausch zwischen Medium und Verbraucher in der Regel sehr träge ist, kann mit dieser Regelungsart eine hohe Temperaturstabilität erreicht werden, ohne dass zusätzliche Thermoelemente in der Form erforderlich sind.

Das Regelverhalten entsprach bei dem 12/160 kW-Gerät einer PID-Regelung, alle anderen Geräte wurden mit Ein/Aus-Regelung (sog. 2-Punkt-Regelung) betrieben. Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden die wichtigsten Störgrößeneinflüsse ausgeschaltet: so wurden die Temperatur des Kühlwassernetzes ebenso wie die Raumtemperatur konstant gehalten. Um Schwankungen der Pumpenleistungen auszuschließen, wurden die Durchflussmengen im Rücklauf beobachtet und gemessen.

Nach Anschluss der Zuleitungen wurde die Form ca. 1 Stunde mit einer Mediumstemperatur von 30°C beaufschlagt. Danach erfolgte die Sollvorgabe der Mediumstemperatur auf 210°C und die Form wurde für eine Zeitdauer von 75 Minuten beheizt. Die Umschaltung in den Kühlbetrieb erfolgte durch die Einstellung auf eine Mediums-Solltemperatur von 50°C.

Ergebnisse zu Vorwärmung und Kühlung

In den **Bildern 16 bis 19** sind die Temperaturverläufe der Mediumstemperatur (gemessen im Vorlauf) bzw. die Oberflächentemperaturen der vier Positionen der Form (gemäß **Bild 11**) bei Betrieb der unterschiedlichen Temperiergeräte ersichtlich. Die Zeitdauer zum Erreichen der Mediums-Solltemperatur von 210°C (ausgehend von 100°C) beträgt bei dem Gerät mit der höchsten Heizleistung von 20 kW rund 9 Minuten und dauert 30 Minuten bei einem Gerät mit nur 9 kW Heizleistung (siehe auch **Tabelle 4** und **Bild 20**).

Im Kühlbetrieb beträgt die Zeit ausgehend von 210°C bis zum Erreichen einer Mediumstemperatur von 50°C rund 4 Minuten beim 60 kW-Aggregat bzw. 17 Minuten beim Gerät mit 20 kW Kühlleistung (**Tabelle 4** bzw. **Bild 20**).

Die Temperaturverläufe der Form, aufgetragen als Mittelwerte aus den 4 Thermoelementtemperaturen, sind in **Bild 21** dargestellt. Generell kann aus den Kurvenverläufen gefolgert werden, dass im Gegensatz zum Verhalten der Mediumstemperaturen nur geringe Unterschiede in den Oberflächentemperaturen auftreten. Die höchste gemittelte Formwandtemperatur nach einer Heizdauer von 75 Minuten beträgt ca. 130°C (20 kW-Gerät). Das Temperiergerät mit der geringsten Heizleistung (9 kW) erzeugt in der gleichen Zeitdauer eine gemittelte Oberflächentemperatur von 125°C.

Die Temperaturunterschiede an der Oberfläche der Form, die sich im Kühlbetrieb der vier unterschiedlichen Geräte ergeben, sind noch geringer, so liegen diese bei allen Aggregaten nach 5 Minuten um ca. 100°C. Nennenswerte Unterschiede treten erst nach 10 Minuten Kühlbetrieb auf. Zu bemerken ist an dieser Stelle, dass vom stärksten zum schwächsten Gerät, die Nennkühlleistungen aber um das Achtfache variieren (160 kW bis 20 kW).

Versuche zur Formenvorwärmung mit variierenden Durchflussmengen

Zur Erfassung der Wirkung unterschiedlicher Durchflussmengen auf die Formwandtemperatur während des Vorwärmens wurde eine Druckgießform mit einem ausreichend dimensionierten Kühlkanalquerschnitt verwendet, wie sie in **Bild 22** skizziert ist. Eine einfache Faustregel für eine überschlägige, aber richtige Grobdimensionierung besagt: *Die Temperierkanalfläche A_K soll mindestens der Sprengfläche A_S des Gussteils entsprechen ($A_K > A_S$)*. Im vorliegenden Fall weist die Kavität eine Sprengfläche von ca. 400 cm² auf. Entsprechend dieser Faustregel gilt, dass die Temperierkanäle bei einem gewählten Durchmesser von 13 mm mit einer Kanallänge von mindestens $l = \frac{A_S}{d \cdot \pi} = 100\,\text{cm}$ in der Form auszuführen sind.

Für die Vorwärmversuche wurde ein Temperiergerät mit einer Heizleistung von 20 kW verwendet und die Förderleistungen zwischen 15 und 30 l/min variiert (die max. Pumpenleistung des Gerätes hätte 60 l/min bei 11 bar betragen). Nach Erreichen einer Solltemperatur des Wärmeträgermediums von 200°C wurde die Temperaturverteilung der Formoberfläche mittels Thermografieaufnahmen, siehe **Bild 23**, dokumentiert [9]. Sind die Kanalquerschnittsflächen, wie im vorliegenden Fall, ausreichend dimensioniert, zeichnet sich die Wirkung höherer

Durchflussmengen auf die Formwandtemperatur während der Vorwärmphase deutlich ab. Bei einer Durchflussmenge von 15 l/min weisen in etwa 60 % der Kavität Oberflächentemperaturen um 150 °C auf. Erhöht sich die Durchflussmenge auf 30 l/min liegen die Spitzentemperaturen um 180 °C und umfassen fast die gesamte Kavität.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Versuche mit vier Temperiergeräten mit Heiz-Kühlleistungen von 9 bis 20 kW zeigen das erwartete Verhalten im Aufheizbetrieb hinsichtlich der Mediumstemperatur: Geräte mit hoher Heizleistung weisen einen wesentlich rascheren Anstieg der Mediumstemperatur auf.

Die Wärmeübertragung in die Form erfolgt jedoch maßgeblich über die Oberfläche der Temperierkanäle. Die verwendete Form „Motorhalter“ wurde in dieser Hinsicht nicht ausreichend dimensioniert, so dass sowohl Form- als auch Formwandtemperaturen bei allen Heiz-/Kühlgeräten (mit Kühlleistungen von 20 bis 160 kW) nur geringe Unterschiede aufweisen. Unabhängig von der Leistung der einzelnen Heiz-/Kühlgeräte stellten sich somit Temperaturverhältnisse ein, die fast ausschließlich durch die Oberfläche der Temperierkanäle und die Durchflussmengen bestimmt wurden.

Als Erkenntnis aus diesen Versuchen lässt sich Folgendes ableiten:

- Wenn die Temperierkanäle nicht optimal ausgelegt wurden, ist die an den Temperiergeräten angegebene Heiz- oder Kühlleistung unerheblich, da diese nicht übertragen werden kann. Die Verwendung von Geräten mit höherer Heiz-/Kühlleistung führt zu keiner Verbesserung der Vorwärmung (weder in der Zeitdauer noch in der maximal erreichbaren Formtemperatur) oder zu einer signifikanten Beschleunigung der Kühlung.
- Wenn die Pumpe die maximalen Förderleistungen, die an der Form zulässig sind, erreicht hat, ist keine weitere Optimierung der Formentemperierung, z. B. über geändertes Regelverhalten, möglich.

Es lässt sich somit feststellen, dass die Temperierung fast ausschließlich von der Fördermenge abhängt, die ihrerseits eine Funktion des Kanalquerschnittes und der Länge der Temperierkanäle darstellt. Hinsichtlich der Werkzeugtemperatur besteht damit kaum ein Einfluss, wie schnell ein Temperiergerät die Mediums-Solltemperatur erreicht bzw. wie rasch das Wärmeträgeröl im Kühlbetrieb auf die gewünschte Endtemperatur abkühlt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Konzeption der „inneren“ Temperierung und die Auslegung der Temperierkanäle bedeutender sind als der Temperiergerätetyp, die (theoretische) Heiz- und Kühlleistung oder das Regelungsverhalten.

Kontaktadressen:

Horst Rockenschaub
Österreichisches Gießerei-Institut
Parkstraße 21
A-8700 Leoben
Tel.: +43/3842-43101-0
E-mail: rockenschaub.ogi@unileoben.ac.at
Homepage: www.ogi.at
Messestand auf GIFA 2007: in der Halle der Institute/Forschungseinrichtungen

Rainer Strohmaier
ROBAMAT Automatisierungstechnik GmbH
Koaserbauerstraße 6
A-4810 Gmunden
Tel: +43/7612-70430-17
E-Mail: strohmaier.rainer@robamat.com
Homepage: www.robamat.com
Messestand auf GIFA 2007: 10C32

Tabelle 1: Auswirkungen von zu hohen oder zu niedrigen Formtemperaturen auf den Druckgießprozess und die Teilequalität

Formtemperatur zu hoch	Formtemperatur zu niedrig
Schlechte Entformbarkeit (infolge Deformation und Kleben)	Schlechte Entformbarkeit (höhere Schrumpfkräfte)
Hoher Sprühmittelverbrauch und Sprühmittelabbau	Schlechte Schmierwirkung des Sprühmittels
Formverschleiss (Störungen an beweglichen Formteilen, Schiebern usw.)	Formverschleiss (größerer Temperaturschock)
Verschlechterte Maßhaltigkeit	Verschlechterte Maßhaltigkeit
Formversatz (durch Temperaturdifferenz der Formhälften)	Vorerstarrungen
Blasenbildung	Kaltläufe, Kaltschweissen
Vermehrt Schwindungslunker	Unvollständige Formfüllung
Zyklusverlängerung	Anschweissen des Gießmetalls

Tabelle 2: Daten des verwendeten Wärmeträgermediums auf Mineralölbasis, Stoffwerte bei 200°C

Wärmeträgermedium: Mineralölbasis, naphtenbasisch		
Max. zulässige Filmtemperatur	300	°C
Stoffwerte bei 200°C		
Dichte	755	kg/m^3
Kinematische Viskosität	0,6	mm^2/s
Spezifische Wärmekapazität	2,52	kJ/(kg*K)
Wärmeleitfähigkeit bei	0,121	W/(m*K)
Dampfdruck	75	mbar
Prandtl-Zahl	12,2	

Tabelle 3: Nenn-Heiz-/Kühlleistungen und Regelungsverhalten der verwendeten Temperiergeräte

Temperier-gerät Nr.	Heizleistung in kW	Kühlleistung in kW	Regelungs-konzept
1	9	20	Ein/Aus
2	12	160	PID
3	18	40	Ein/Aus
4	20	60	Ein/Aus

Tabelle 4: Zeitdauer im Heizbetrieb für den Temperaturbereich 50°C bis zum Erreichen der Solltemperatur von 210°C bzw. Zeitdauer im Kühlbetrieb für den Temperaturbereich von 210°C auf Solltemperatur 50°C (Mediumstemperaturen, Messung im Vorlauf)

	Zeitdauer in min. für Heizen im Temp.bereich	Zeitdauer in min für Kühlen im Temp.bereich
Heiz-/Kühl-leistung in kW	100 - 210 °C	210 - 50 °C
18/40 kW	9	16
20/60 kW	9	3,8
12/160 kW	23	7,6
9/20 kW	30	17

Pos.	Kühlen	Medium	Energietransfer
1	Kolben	Wasser	Wärmeleitung
2	Gießkammer	Wasser / Öl	Wärmeleitung
3	Gegenzapfen	Wasser	Wärmeleitung
4	Form	Wasser / Öl	Wärmeleitung
5	Anschnitt	Wasser / Öl	Wärmeleitung
6	Wärmeabgabe an Luft	Luft	Strahlung / Konvektion
7	Wärmeabgabe an Aufspannplatten	Stahl	Wärmeleitung
8	Sprühen	Sprühmittel	Wärmeleitung

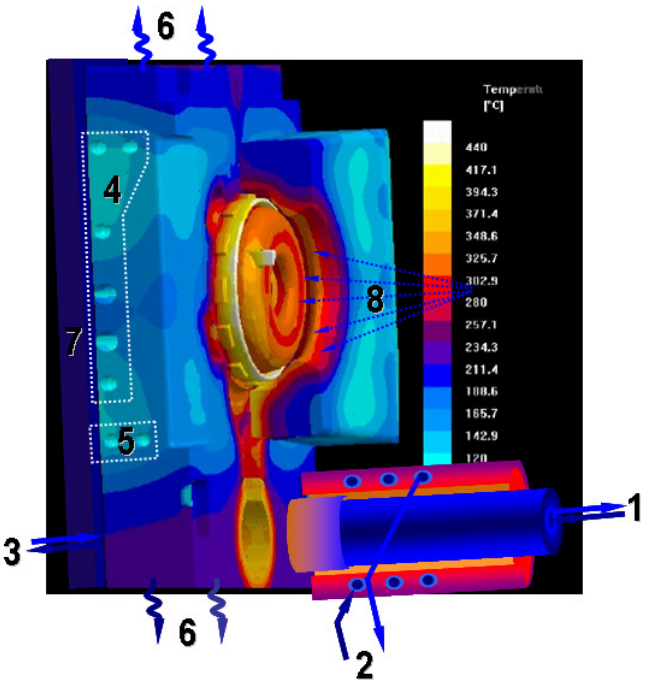

Bild 1: Möglichkeiten des Einbringens und Abführens von Wärme einer Druckgießform, Energietransfermechanismen und mögliche Medien

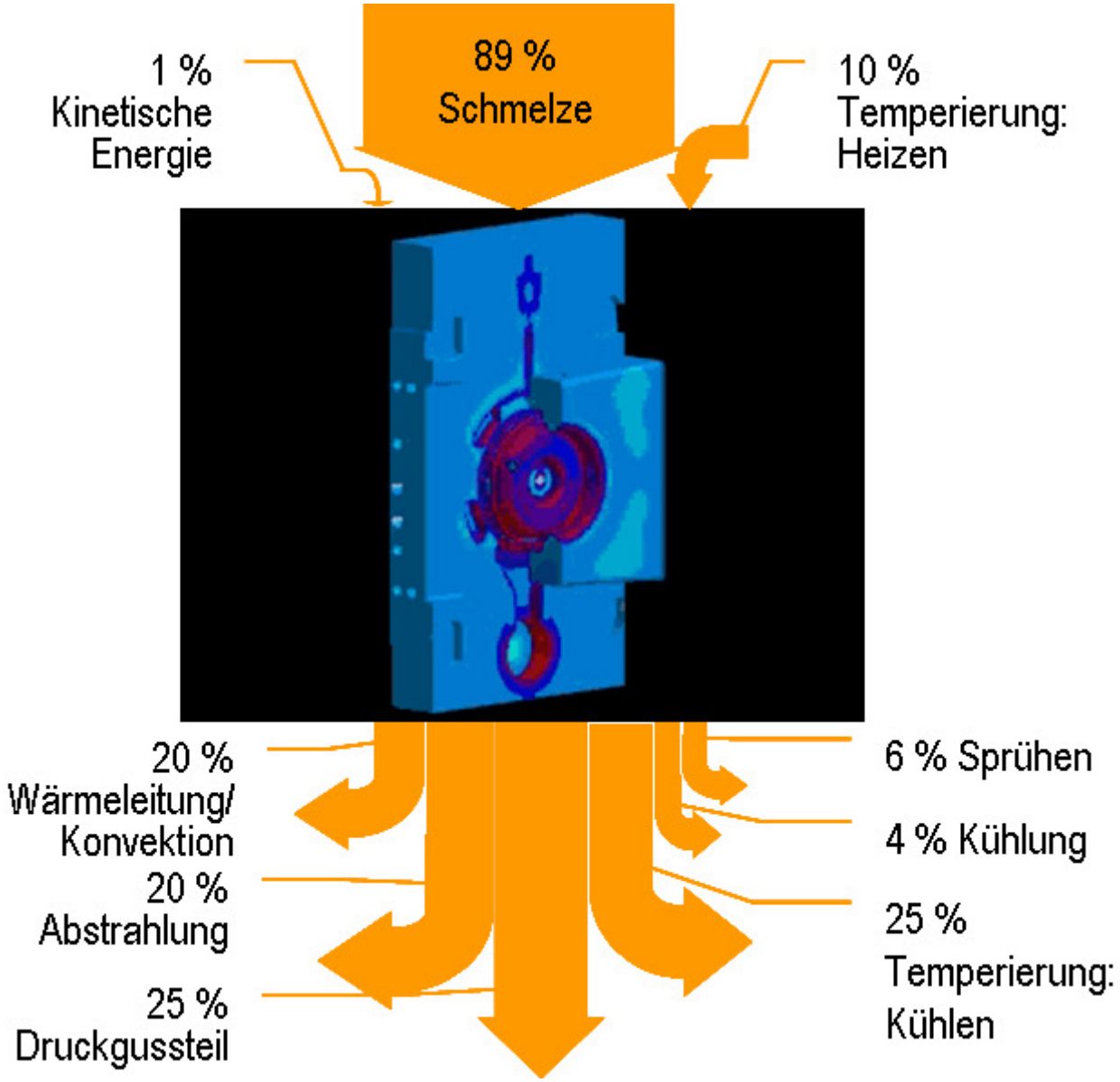

Bild 2: Wärmebilanz (Sankeydiagramm) einer Druckgießform, in Anlehnung an [4], überschlägige Berechnung für ein Gussteil mit 2,2 kg Schussgewicht aus der Legierung Al Si9Cu3(Fe) und für eine Gießtemperatur von 620 °C bzw. einer Entformtemperatur von 270 °C

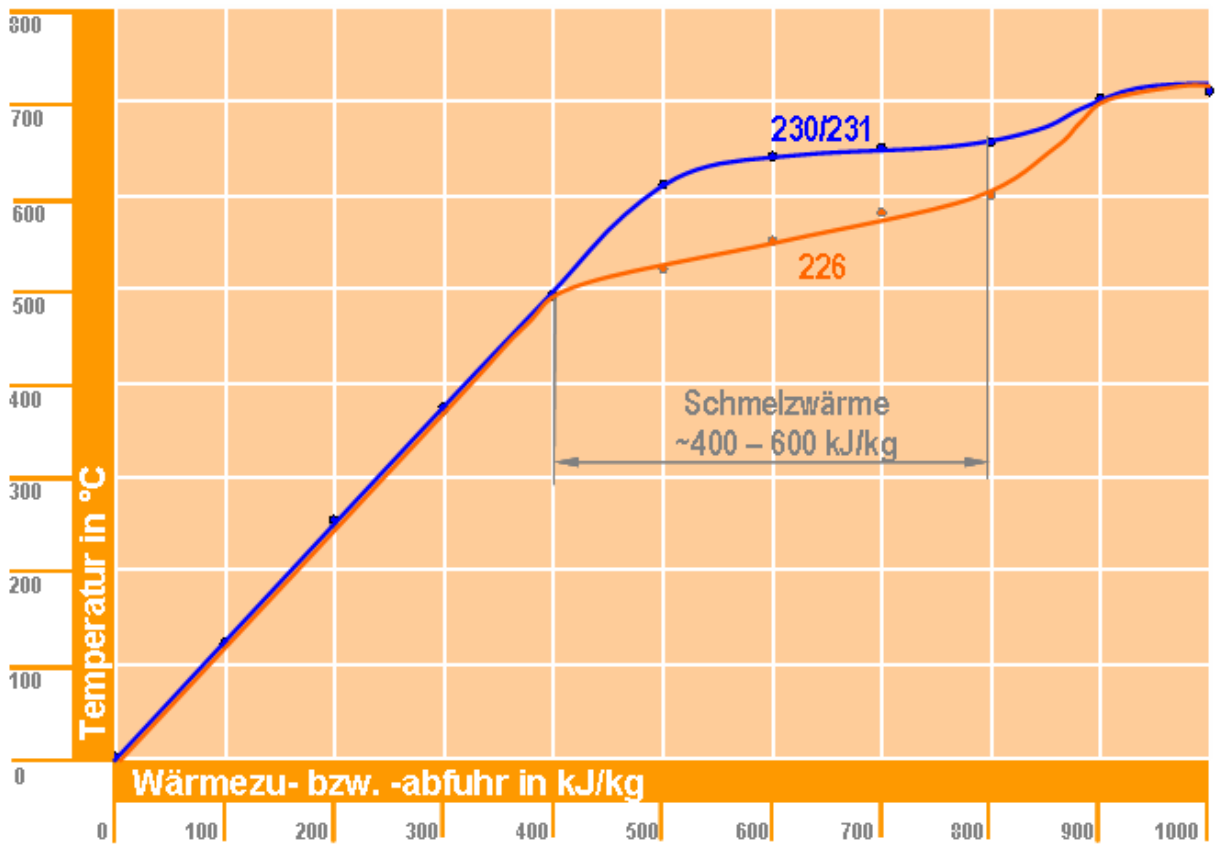

Bild 3: Wärmezu- und -abfuhr bei Aluminium-Druckgusslegierungen: zum Aufschmelzen benötigte bzw. beim Abkühlen frei werdende Wärmemengen für die untereutektische Druckgusslegierung Al Si9Cu3(Fe) (VDS 226) bzw. die eutektischen Legierungen Al Si12Cu1(Fe)/Al Si12(Fe) (VDS 230/231)

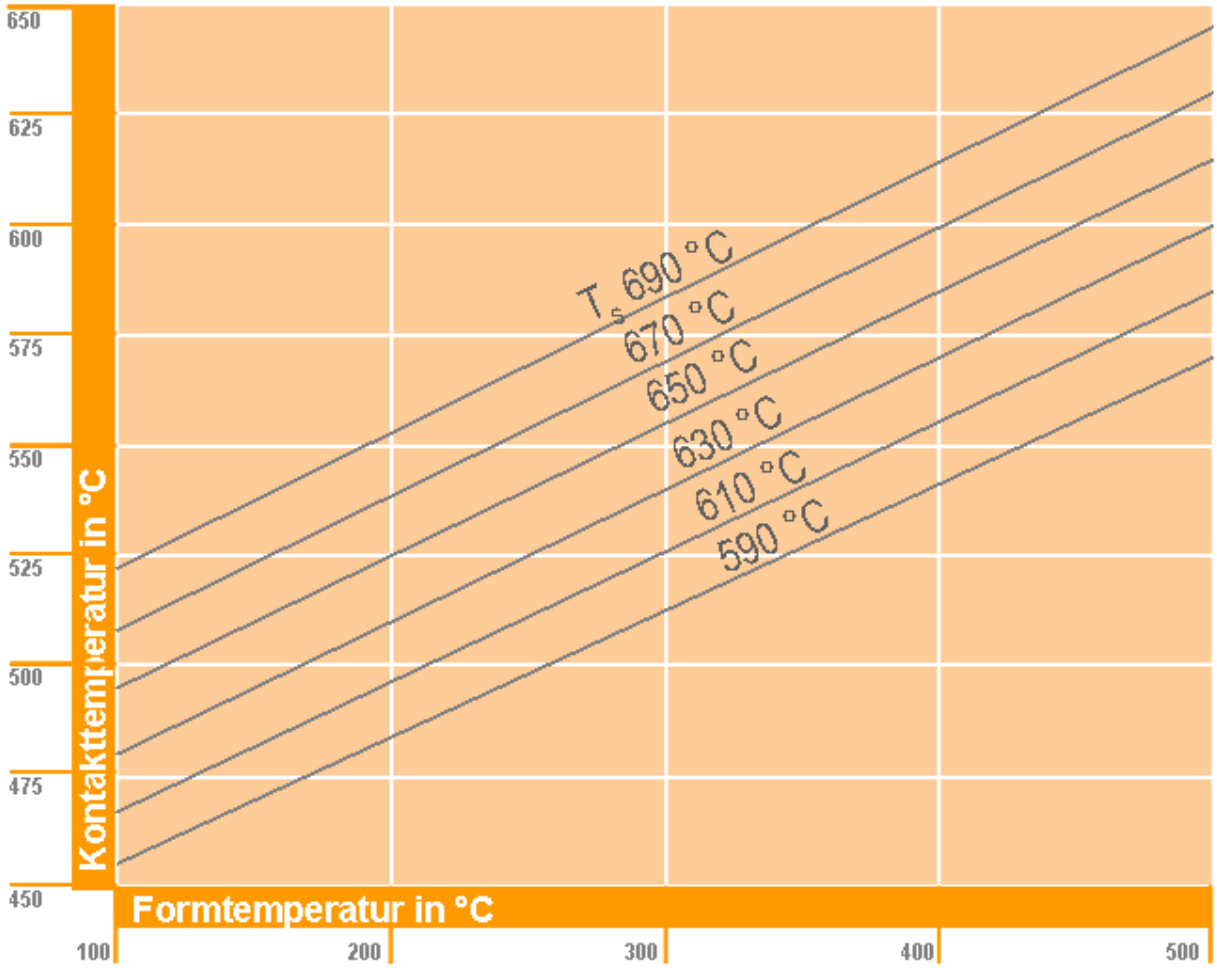

Bild 4: Zusammenhang zwischen Kontakttemperatur (Formwandtemperatur) und Formtemperatur in Abhängigkeit der Schmelzetemperaturen T_S, in Anlehnung an [8] für die Legierung Al Si9Cu3(Fe)

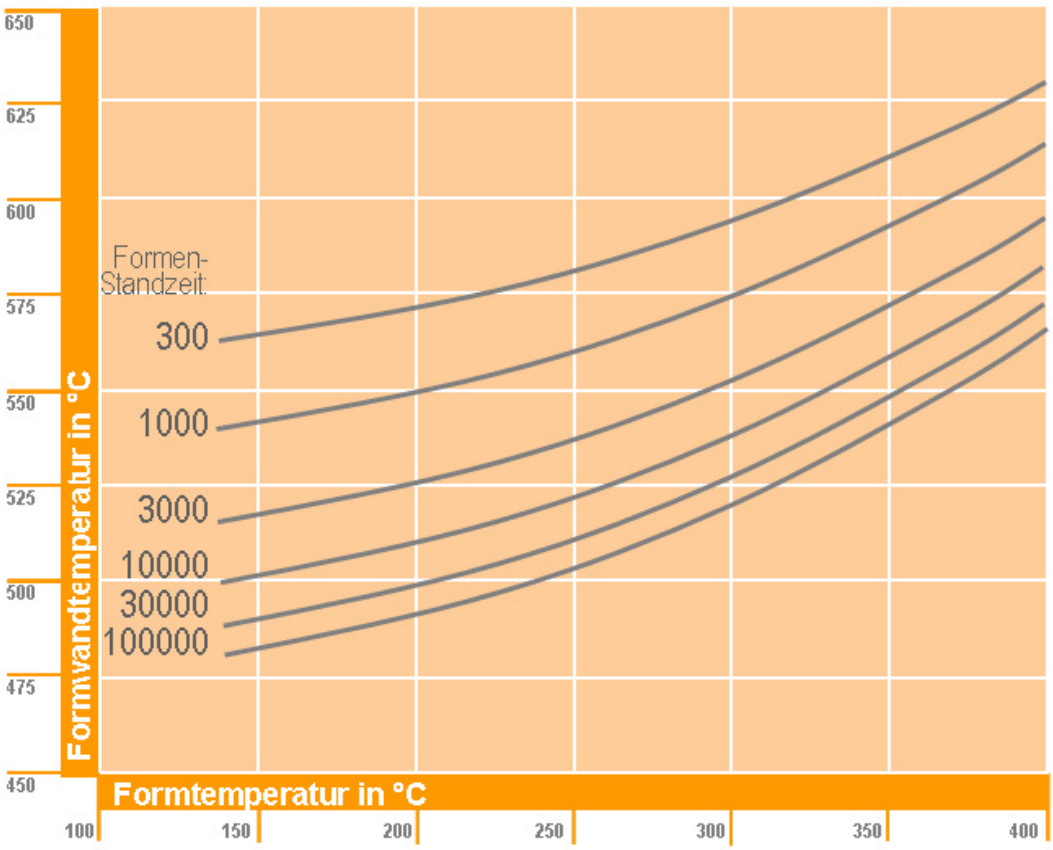

Bild 5: Formenstandzeit als Funktion der mittleren Formwand- und Formtemperatur (Mediumstemperatur), in Anlehnung an [8]

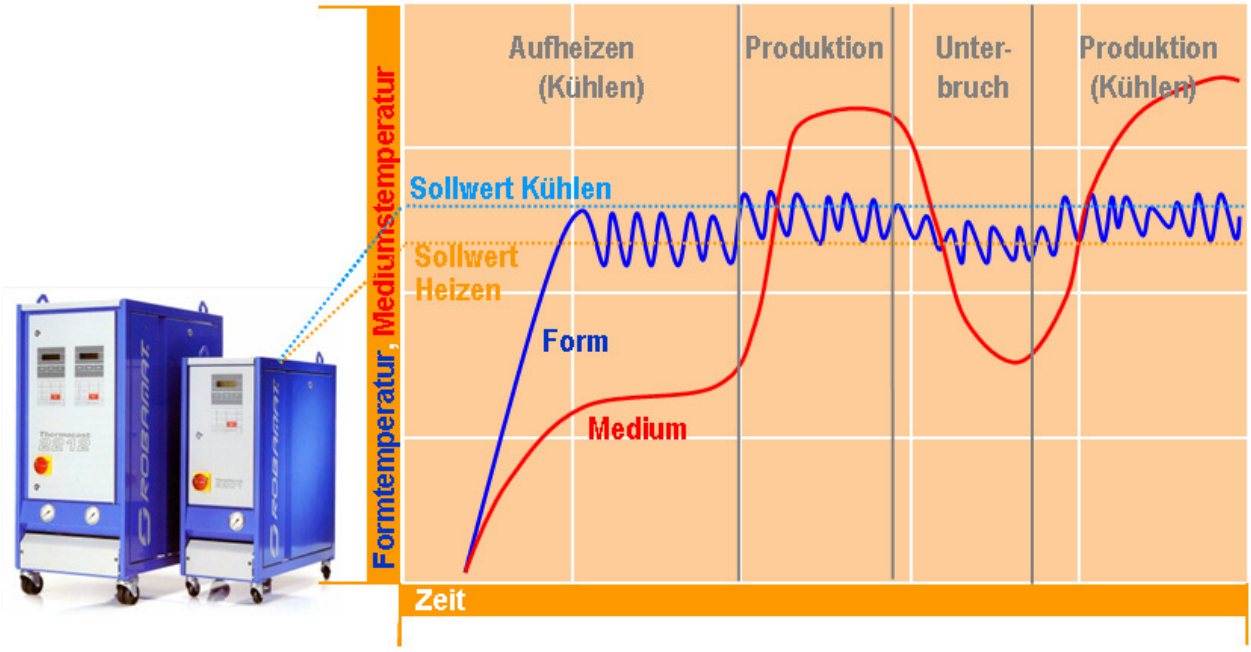

Bild 6: Aufgaben der Formentemperierung: Aufheizen der Form auf Betriebstemperatur und Halten der Form auf Betriebstemperatur durch Regelung der Formtemperatur

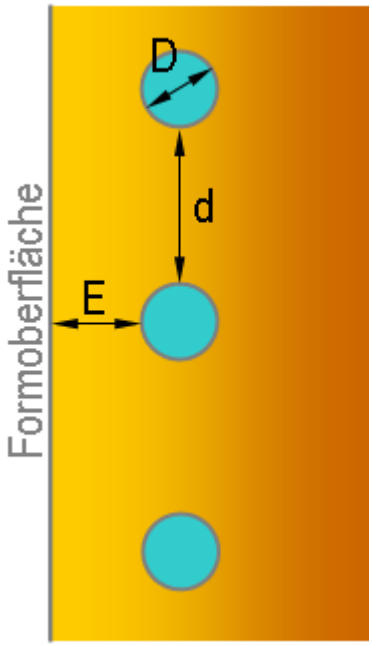

Bild 7: Daumenregel für die Auslegung von Temperierkanälen (bei Öl als Wärmeträgermedium): Bei einem Kanaldurchmesser D sind ein Mindestabstand von E >1,5 x D und Kanalabstände von d ~ 3 - 5 x D einzuhalten

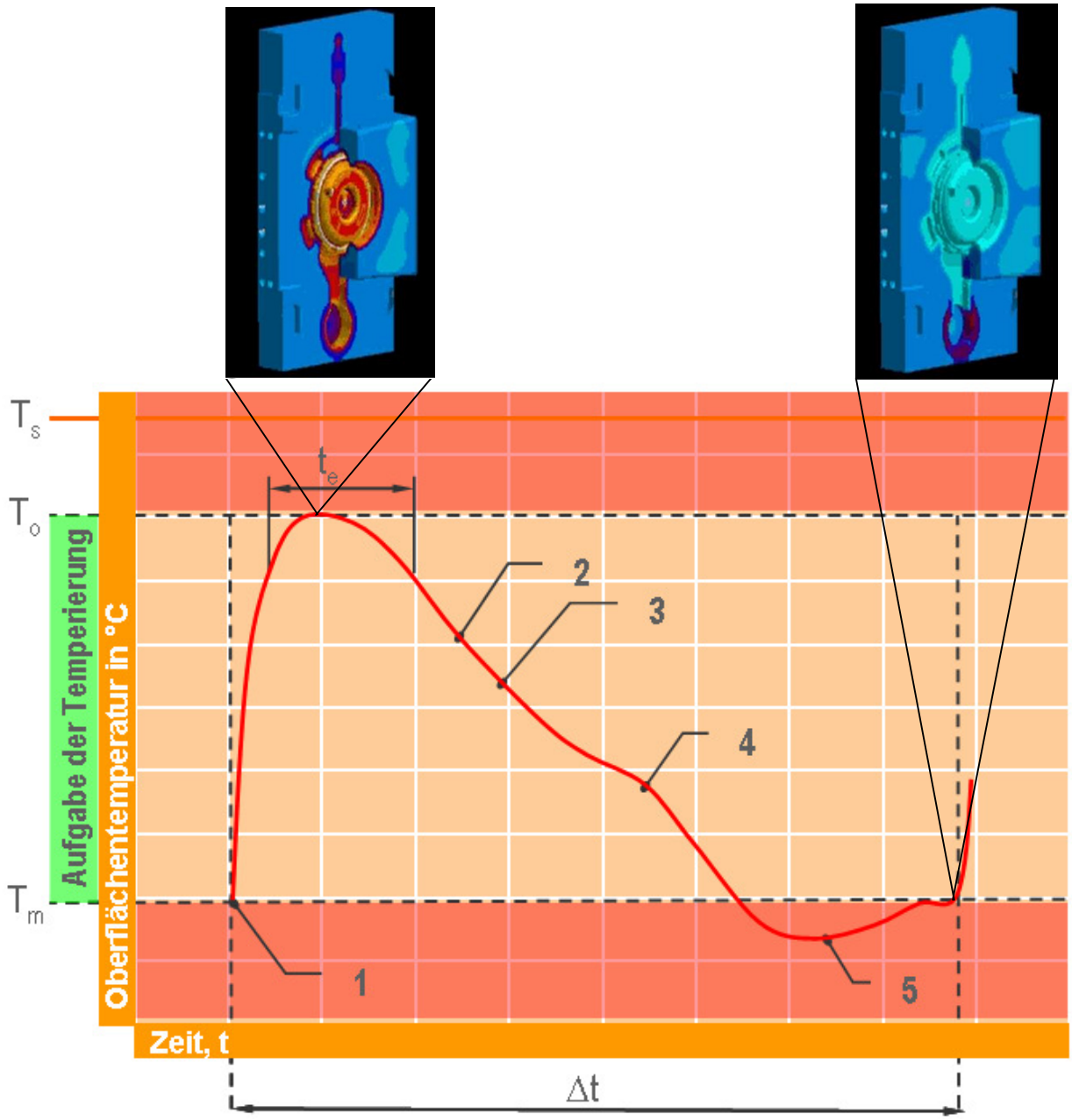

Bild 8: Diagramm: Oberflächentemperatur einer Druckgießform in Abhängigkeit der Zeit t für einen Gießzyklus, kleine Bilder: Temperaturverteilung der Form zum Zeitpunkt der Maximaltemperatur bzw. vor Beginn des Schusses

Δt	Zykluszeit
t_e	Zeit für die Erstarrung des Gussteiles
T_m	Vorwärmtemperatur
T_o	Maximale Oberflächentemperatur
T_s	Schmelzetemperatur

1 Beginn der Formfüllung

2 Ankühlen des Gussteiles in der Form

3 Öffnen der Form

4 Sprühbeginn

5 Schließen der Form

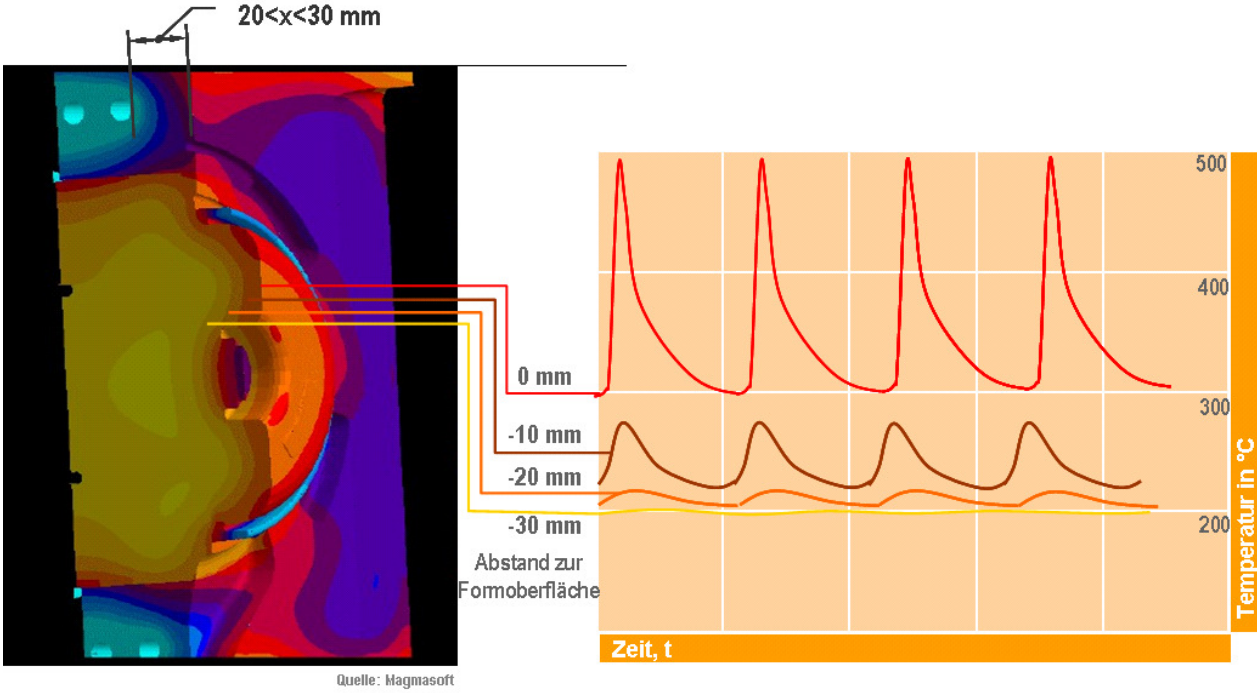

Bild 9: Temperaturverteilung der Form: Verlauf der Temperaturen in Abhängigkeit des Abstandes zur Formoberfläche

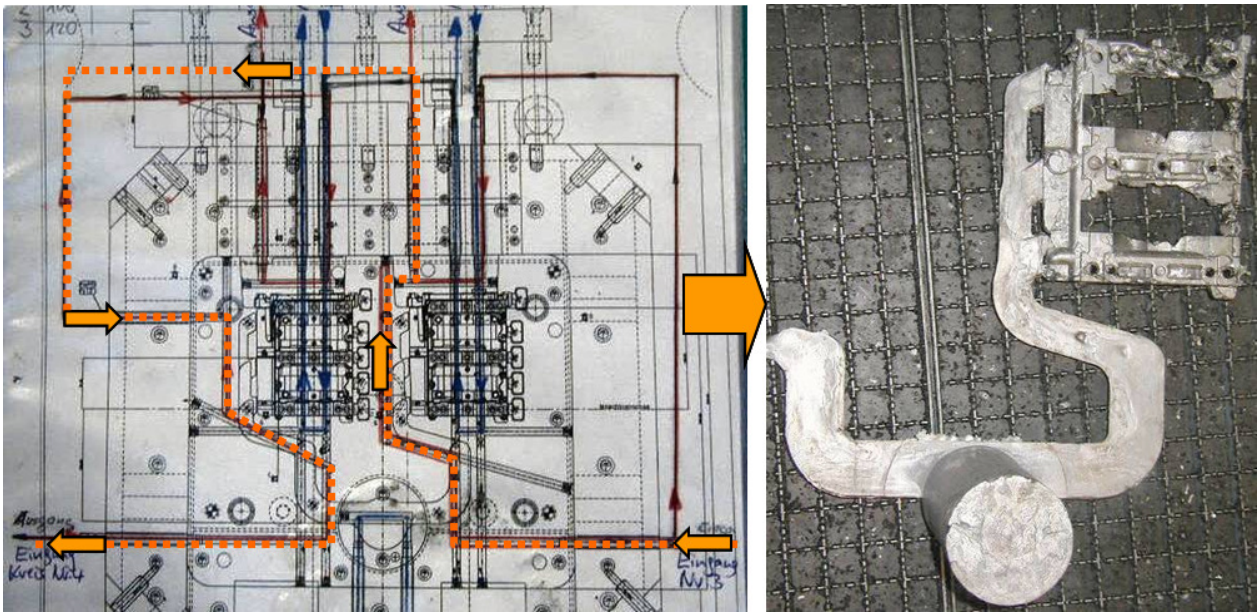

Bild 10: Auswirkungen einer ungenügenden Formtemperierung auf die Füllung (mit langsamer Füllgeschwindigkeit) nach Änderung des Temperierkonzeptes, linkes Formnest wird mit geringeren Mediumstemperaturen versorgt: frühzeitige Erstarrung des linken Laufsystems

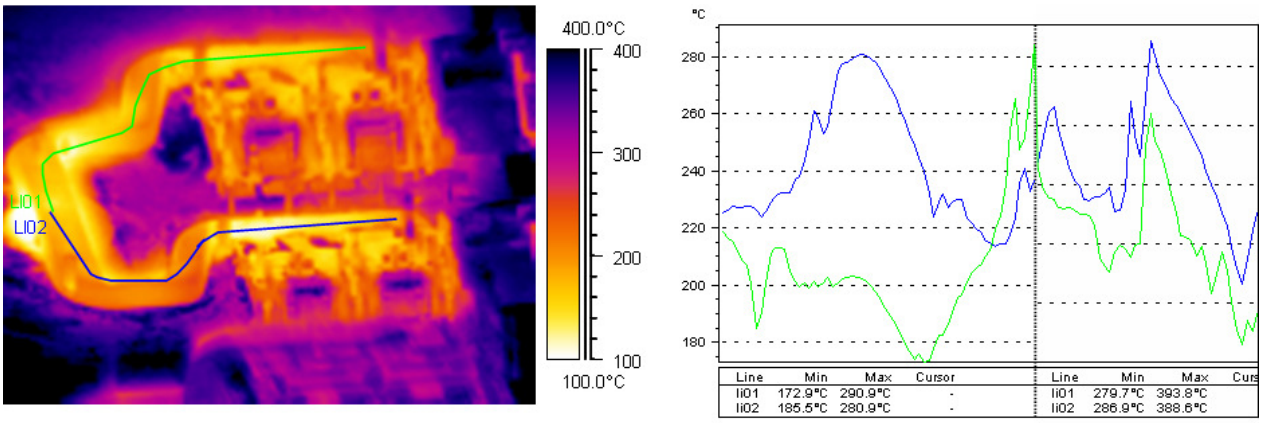

Bild 11: Thermografie-Aufnahme der Druckgießform: deutliche Temperaturunterschiede in den Formnestern insbesondere entlang der seitlichen Läufe und Anschnitte

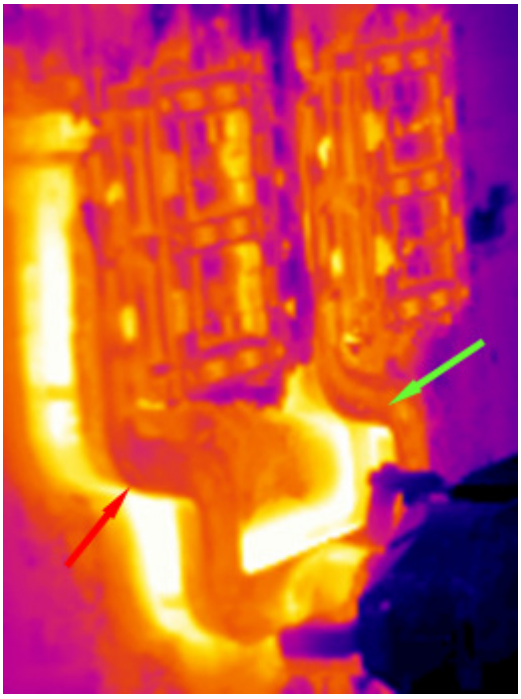

Bild 12: Thermografie-Aufnahme der Gusstraube, das Laufsystem links weist generell eine deutlich kühlere Temperaturverteilung als das rechte Laufsystem auf.

Bild 13: Zweikreistemperiergerät für Öl, Hersteller Robamat Automatisierungstechnik GmbH, Gerätedaten: max. Vorlauftemperatur 350 °C, Heizleistung 2x20 kW, Kühlleistung 2x60 kW, max. Pumpenleistung 2 x75 l/min (11bar)

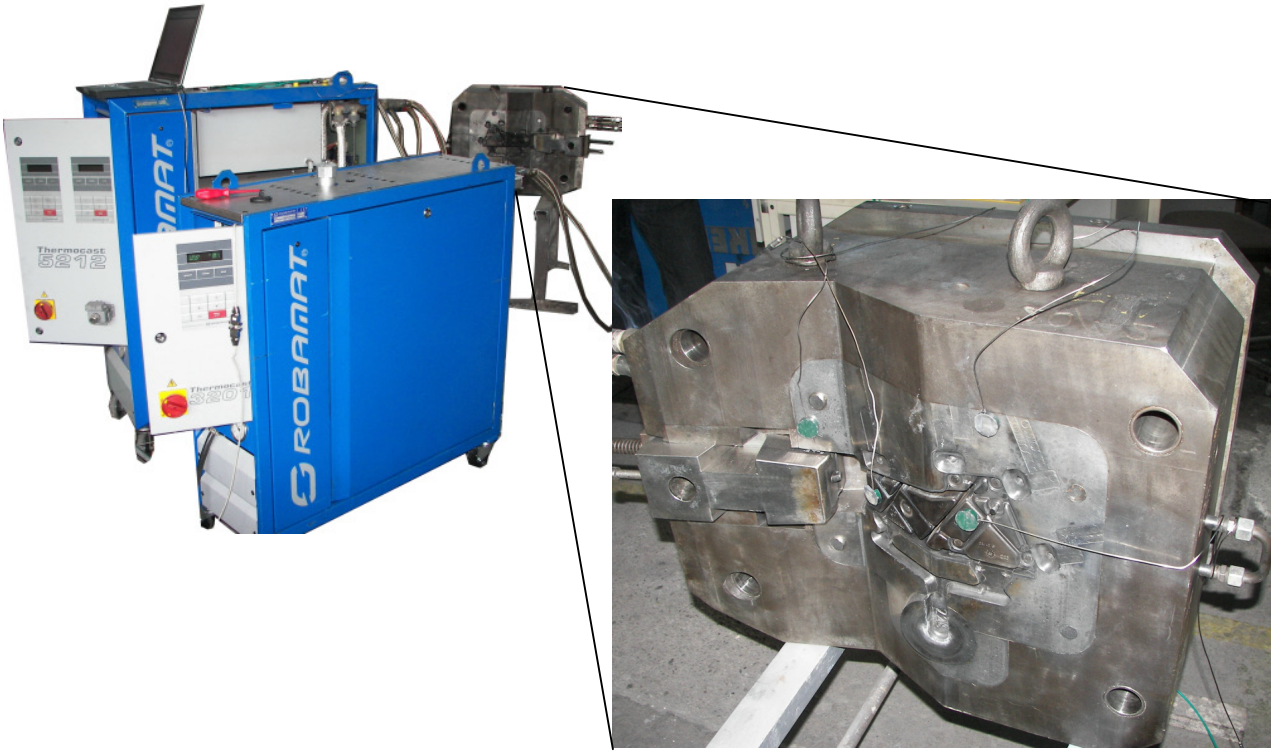

Bild 14: Versuchsaufbau für die Formenvorwärmung und Kühlung, Messung der Oberflächentemperaturen am Formeinsatz

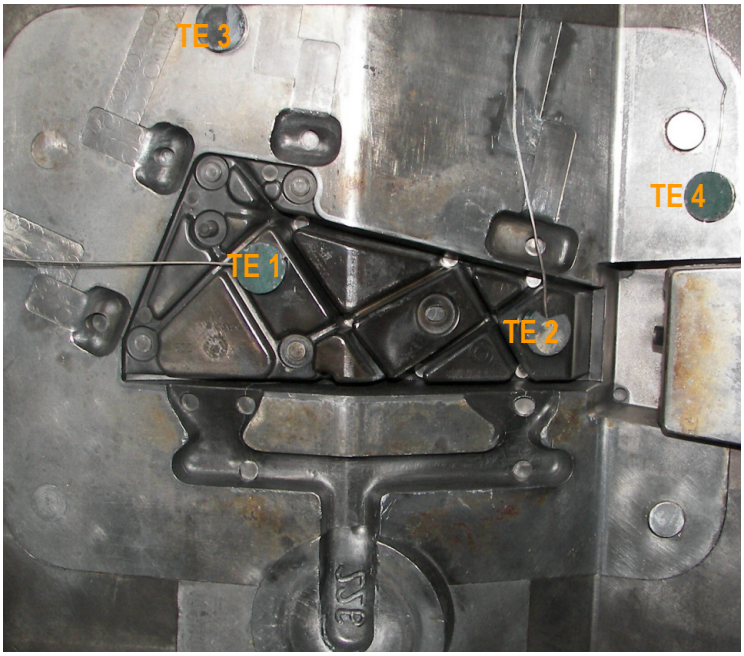

Bild 15: Formeinsatz und Positionen der Thermoelemente TE 1 bis TE 4

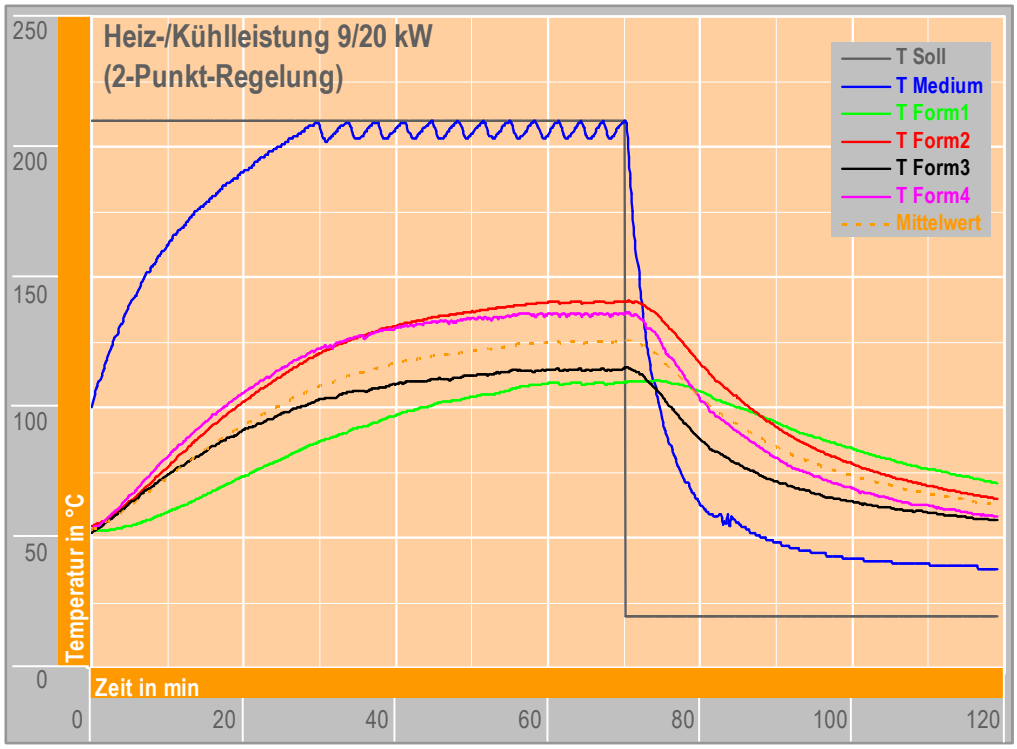

Bild 16: Temperiergerät 1: Heiz-/Kühlleistung 9/20 kW mit 2-Punkt-Regelung der Mediumstemperatur; Verlauf der Mediums- und Oberflächentemperaturen

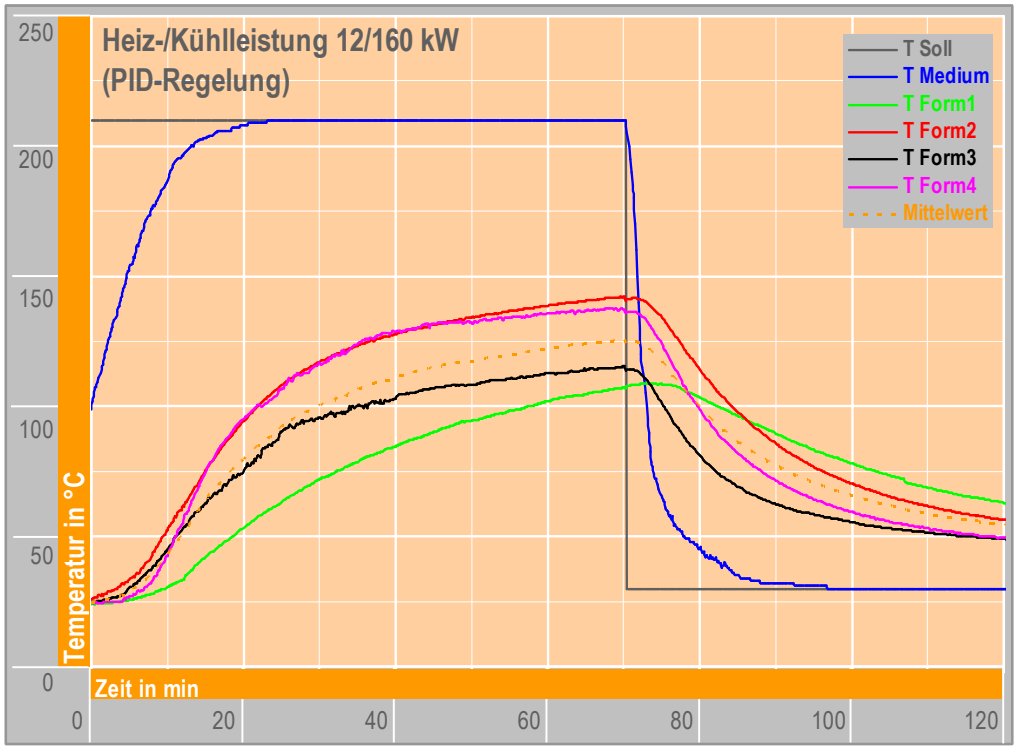

Bild 17: Temperiergerät 2: Heiz-/Kühlleistung 12/160 kW mit PID-Regelung der Mediumstemperatur; Verlauf der Mediums- und Oberflächentemperaturen

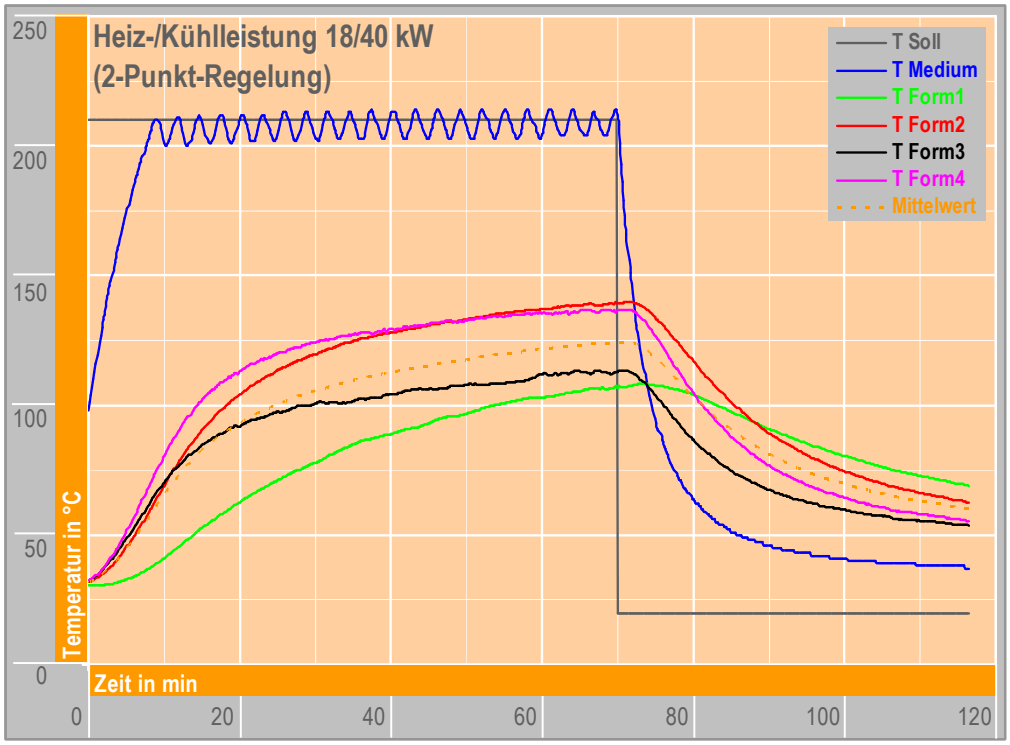

Bild 18: Temperiergerät 3: Heiz-/Kühlleistung 18/40 kW mit 2-Punkt-Regelung der Mediumstemperatur; Verlauf der Mediums- und Oberflächentemperaturen

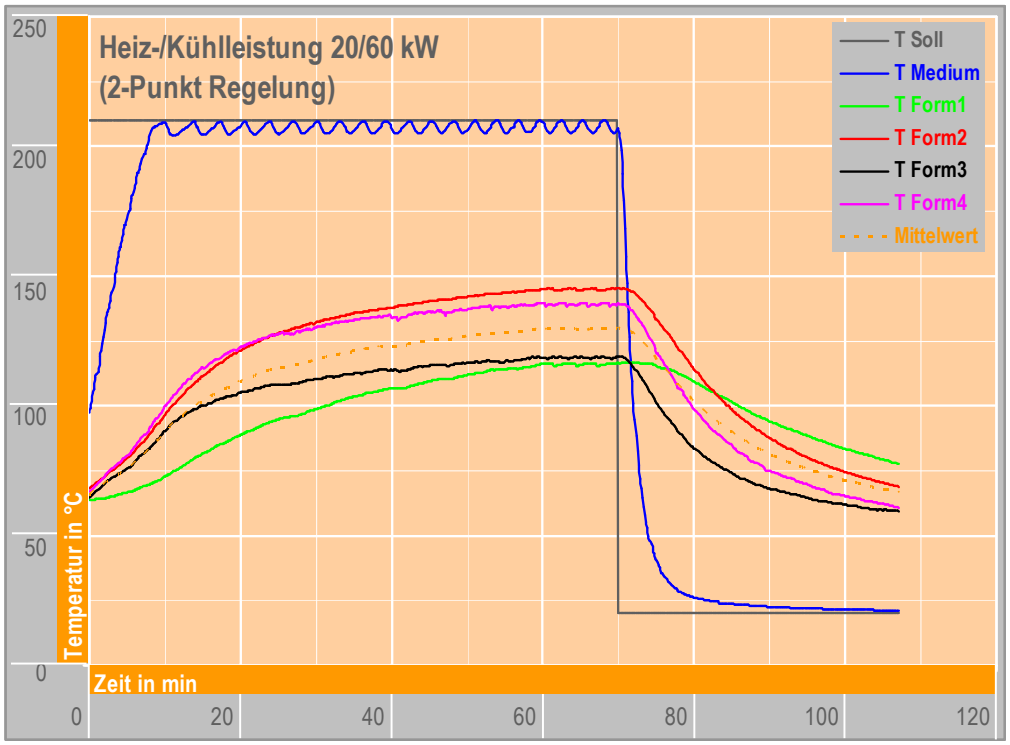

Bild 19: Temperiergerät 4: Heiz-/Kühlleistung 20/60 kW mit 2-Punkt-Regelung der Mediumstemperatur; Verlauf der Mediums- und Oberflächentemperaturen

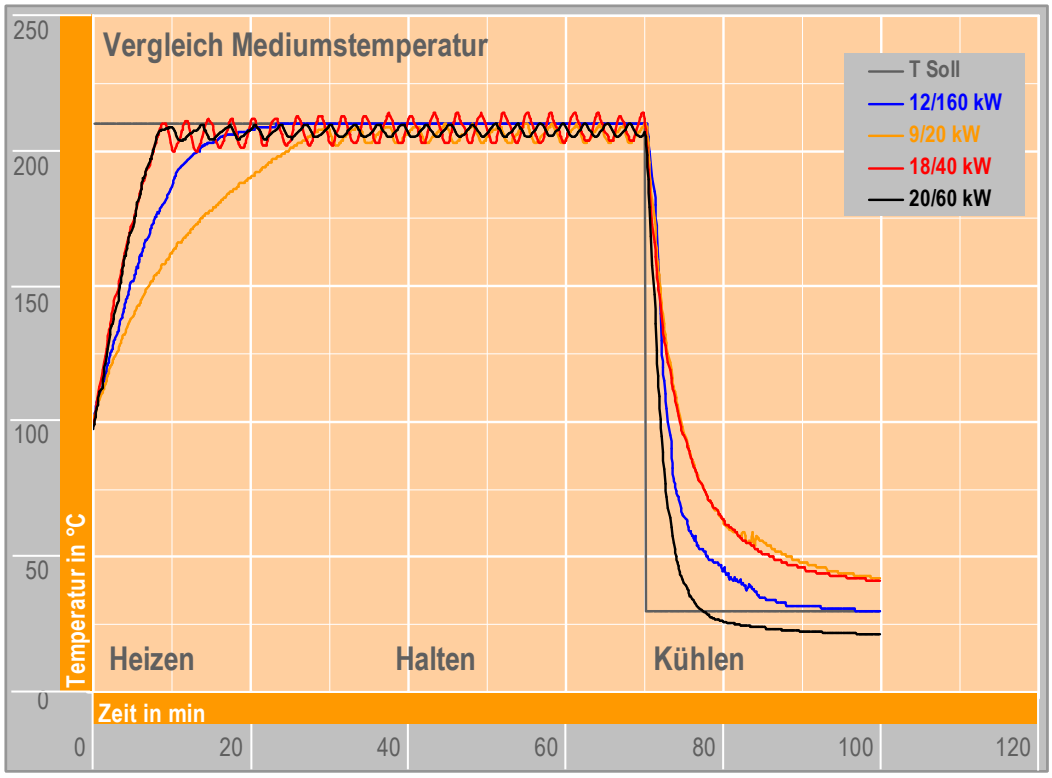

Bild 20: Vergleich der Mediumstemperaturen (Messung im Vorlauf)

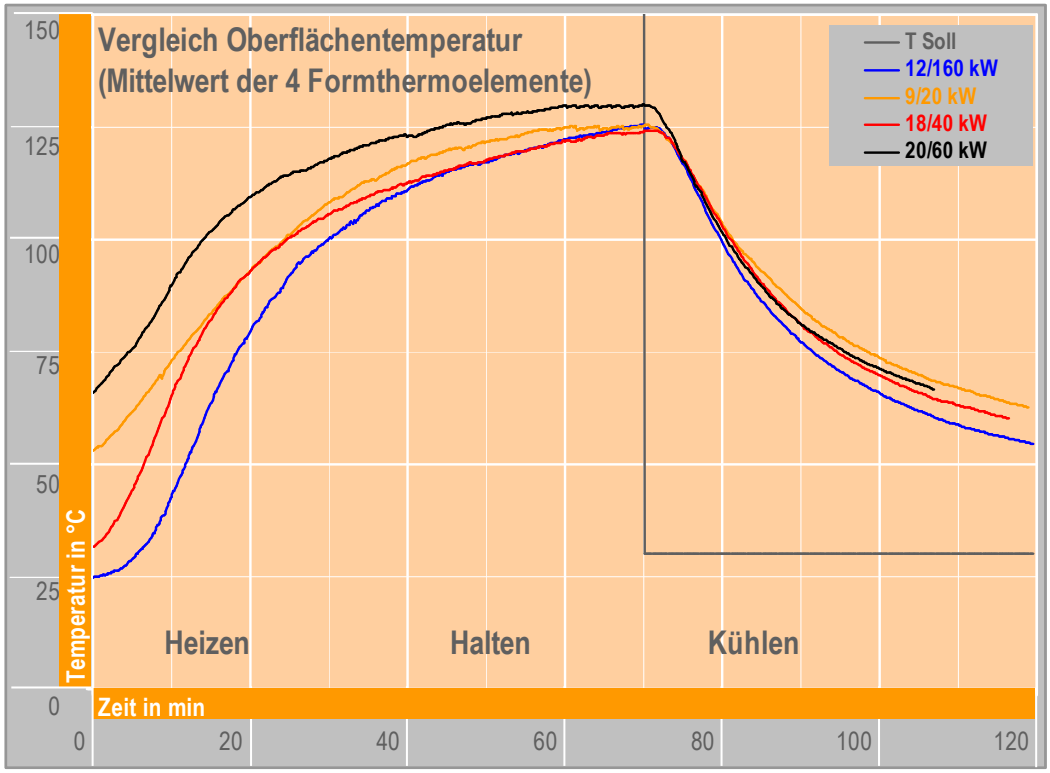

Bild 21: Vergleich der Oberflächentemperaturen (als Mittelwerte der 4 Thermoelement-Formtemperaturen)

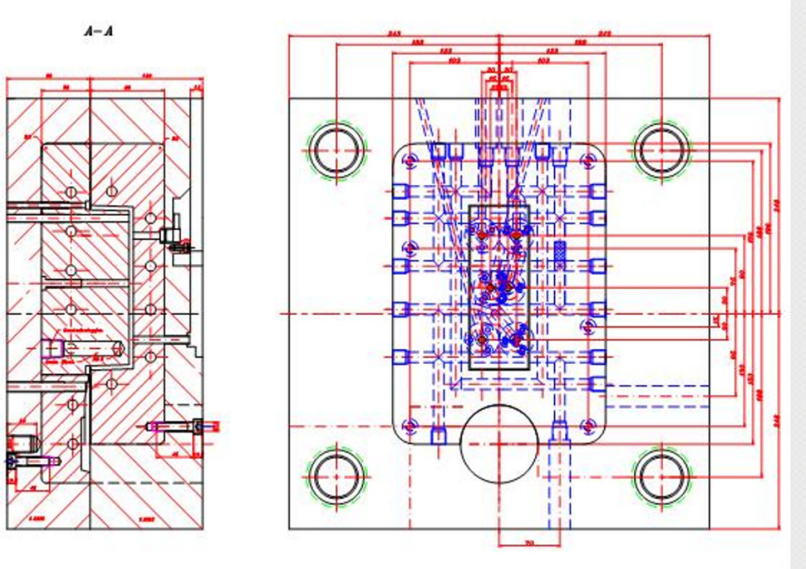

Bild 22: Formtemperierkonzept für Formenvorwärmversuche mit unterschiedlichen Durchflussmengen

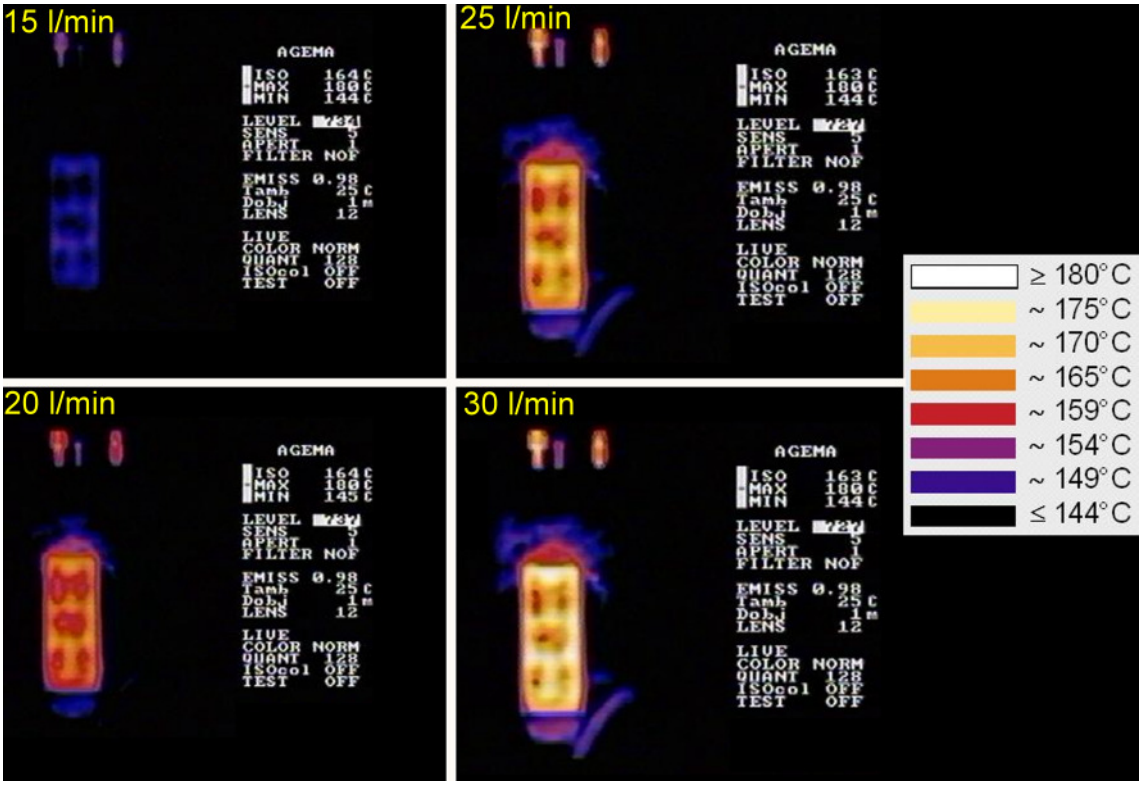

Bild 23: Thermografieaufnahmen der Formoberfläche: Temperaturverteilung nach Erreichen der Soll-Mediumstemperatur von 180 °C mit Durchflussmengen von 15, 20, 25 und 30 l/min (max. Durchflussmenge der form: 60 l/min)

---

[1] Nogowizin B.: Instationäre Temperaturverteilung in den Teilen der Druckgießform, Giessereiforschung 54 (2002), Nr.1, S. 29-37.

[2] Sequeira W., Kind R., Andersen S., Greenless G.: Druckguss-Praxis Nr.6/2006, S. 235-242.

[3] Gorbach P.: Handbuch der Temperierung mittels flüssiger Medien, Hüthig Verlag, 1997.

[4] Breitinger R.: Giesserei 70 (1983), Nr. 5, Seite 133 ff.

[5] Nogowizin B., Friebe G.: Druckguss-Praxis Nr. 4/2002, S. 101-108.

[6] Berns H.: Druckguss-Praxis Nr. 5/2005, S. 65-72.

[7] Danzer R., Sturm F.: Archiv Eisenhüttenwesen 53 (1982), Nr. 6

[8] Klein F., Szimon H. W.: Giesserei-Praxis (1990), Nr. 9/10, S. 141-153.

[9] Stromaier R.: NADCA Plant Manager Conference, Minnesota, Minneapolis, 2006.