

Beiträge zur Auslegung von konturnahen Temperierkanälen in Werkzeugen bei thermisch-zyklischen Prozessen

Marcus Rohne¹, Jens Meinert¹, Tobias Fieback²

¹ Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau

² TU Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Straße 7, 09599 Freiberg

Abstract

Diese Arbeit beschreibt Untersuchungen des stationären wie instationären Wärmetransportes innerhalb idealisierter Probekörper von typischen Temperierkanalanordnungen des Werkzeugbaus. Die Untersuchungen erfolgen dabei sowohl experimentell als auch numerisch und dienen der Bestimmung von Wärmedurchgangskoeffizienten und des instationären Abkühlverhaltens in Abhängigkeit der Kanalanordnung. Auch der zeitliche Verlauf von Temperaturdifferenzen auf der zu temperierenden Oberfläche zur Beurteilung der Inhomogenität des Wärmetransportes wird betrachtet. Aus den Ergebnissen werden auf analytischen Überlegungen basierende halbempirische Berechnungsgleichungen erarbeitet, welche die effektive Auslegung derartiger Systeme ermöglichen. Die Gleichungen erlauben die Bestimmung der zeitlichen Verläufe der mittleren Temperatur der Werkzeugwand sowie der maximalen Wandtemperaturdifferenz (Temperaturinhomogenität). Im Ergebnis wird eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment, Simulation und den erarbeiteten Gleichungen festgestellt.

1. Motivation

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Etablierung additiver Fertigungsverfahren ergeben sich für Konstrukteure des Werkzeug- und Formenbaus neue Freiheitsgrade bei der Auslegung der Temperierkanäle entsprechender Werkzeuge der Ur- und Umformtechnik. Klassische Anwendungsfelder sind etwa Werkzeuge zur Herstellung von Bauteilen aus thermoplastischen Kunststoffen durch Spritzgießen. Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines derartigen Werkzeuges im geöffneten Zustand.

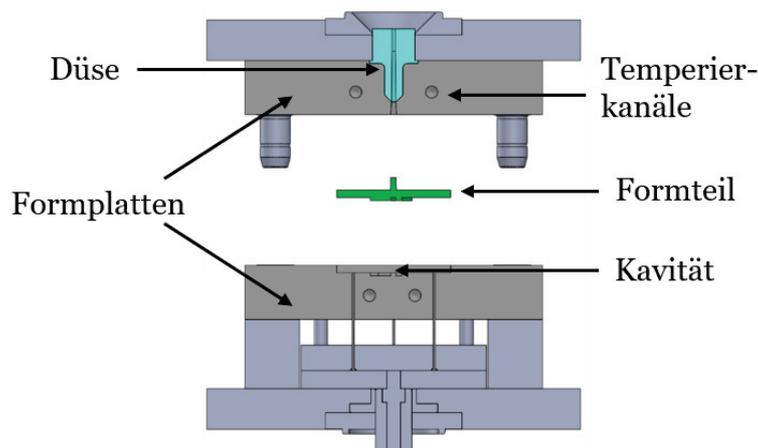


Abbildung 1: Grundlegender Aufbau eines Spritzgießwerkzeuges im geöffneten Zustand.

Die Fertigung durch Spritzgießen ist durch eine zyklische Verfahrensweise gekennzeichnet. Über die Düse wird der plastifizierte Kunststoff in das geschlossene Werkzeug bis zur vollständigen Füllung der formgebenden Kavität eingespritzt. Danach wird die über den Kunststoff eingebrachte Wärme über Temperierkanäle, welche von einem Kühlmedium durchströmt werden, abtransportiert. Dieser Vorgang erfolgt bis zur Erreichung einer für das jeweilige Material spezifischen Entformungstemperatur, so dass im Anschluss das Bauteil durch Öffnen des Werkzeuges entnommen und schließlich der Vorgang durch abermaliges Schließen wiederholt werden kann. Die damit verbundene Zykluszeit liegt im Bereich weniger Sekunden bis Minuten, wobei mit bis zu 80 % der Hauptteil auf die Kühlphase entfällt (Kanbur, Suping, & Duan, 2020). Dies verdeutlicht bereits die besondere Bedeutung der Temperierung vor dem Hintergrund der Produktivität des Verfahrens.

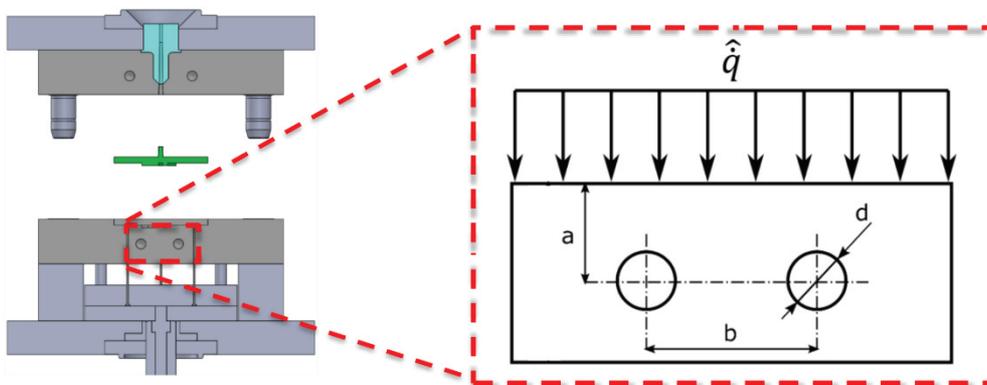


Abbildung 2: Prinzipielle Darstellung eines Spritzgießwerkzeuges mit den geometrischen Daten der Temperierkanalanordnung (a ... Wandabstand, b ... Kanalabstand, d ... Kanaldurchmesser)

Zur Auslegung derartiger Temperierkanäle existieren etablierte Ansätze, welche vielfach in der Literatur beschrieben werden (Kazmer, 2016; Zöllner, 1999; Hopmann, Menges, Michaeli, & Mohren, 2018). Diese zielen auf eine Festlegung der wesentlichen Parameter der Kanalanordnung, wie des Kanaldurchmessers d sowie des Wand- und Kanalabstandes a und b (siehe Abbildung 2). Allerdings sind diese Ansätze auf den quasistationären Fall beschränkt, bei welchem von einer nahezu konstanten Temperatur der Werkzeugwand ausgegangen werden kann. Bei der Anwendung auf thermisch zyklische (variotherme) Verfahren, welche durch einen aktiven Wechsel zwischen einer oberen und einer unteren Wandtemperatur während eines Zyklus gekennzeichnet sind, können die etablierten Ansätze daher nicht ohne Weiteres zur Anwendung kommen. Selbiges gilt für die Auslegung von Kanälen, deren Anordnung und Gestalt von jenen der klassischen, durch geradliniges Bohren hergestellten kreisrunden Form abweichen. Durch die neuartigen additiven Verfahren zur Fertigung der Werkzeuge sind dabei vielfältige Alternativen zu klassischen Kanälen realisierbar.

Ein aussichtsreiches neuartiges Konzept stellen in dem Zusammenhang sogenannte konturnahe Temperierkanäle dar (Jansen, 2014). Diese versprechen eine Effizienzsteigerung der Verfahren durch eine Verkürzung der Zykluszeiten bei einer gleichzeitig verbesserten Bauteilqualität infolge der Homogenisierung des Wärmetransportes. Vor al-

lem bei einer variothermen Prozessführung kommen die Vorteile konturnaher Temperierkanäle dabei zum Tragen, da durch die Nähe zur Werkzeugwand eine deutliche Minimierung der aktiv zu temperierenden Masse erfolgt. Neben einer Effizienzsteigerung durch eine Zykluszeitminimierung bedeutet dies auch eine Minimierung des zur Temperierung erforderlichen Wärmebedarfs und somit eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit.

Problematisch ist in diesem Zusammenhang die mit den zusätzlichen Freiheitsgraden einhergehende Zunahme des Aufwandes zur Auslegung der Temperierkanäle (Faßnacht, 2014). Weiterhin erfordert der beschriebene Mangel an analytischen Gleichungen für derartige Geometrien weiterführende Forschungsarbeit zur Erweiterung der Grundlagen. Besonders bei der variothermen Prozessführung sind hier neue Modelle zur Beschreibung des instationären (zeitabhängigen) Wärmetransportes in derartigen Kanalgeometrien erforderlich, um eine von numerischen Methoden unabhängige Auslegung zu ermöglichen oder um brauchbare Startwerte für die iterative Detailauslegung zu generieren, wodurch eine Reduzierung der Anzahl an erforderlichen Iterationsschritten möglich ist. Die Modelle müssen dabei eine Abschätzung der quantitativen (Zykluszeit) und der qualitativen (Inhomogenität der Wandtemperatur) Wärmetransporteigenschaften gleichermaßen ermöglichen.

Diesen Herausforderungen widmet sich das Promotionsvorhaben des Erstautors mit einem Fokus auf die Erweiterung bestehender Auslegungsgrundlagen auf den Spezialfall quadratischer Temperierkanäle und die Entwicklung instationärer Modelle für kreisrunde und quadratische Kanäle gleichermaßen.

2. Herangehensweise und Methodik

Die Herangehensweise bei der Untersuchung der beschriebenen Fragestellungen ist durch eine enge Verzahnung numerischer und experimenteller Methoden gekennzeichnet. Untersuchungsgegenstand ist ein auf dem klassischen Ansatz der segmentierten Kanalauslegung (Hopmann, Menges, Michaeli, & Mohren, 2018) basierendes Modell einer sogenannten Einheitszelle, welches durch die Verbindung eines Temperierkanals und eines dazugehörigen Wandstückes gekennzeichnet ist. In Abbildung 3 (links) ist ein exemplarischer Probekörper zur messtechnischen Untersuchung dargestellt. Dabei wird die in der Realität von einem erstarrenden Spritzgießbauteil abgegebene Wärme im Labor mit Hilfe einer regelbaren elektrischen Heizfolie simuliert, die auf die Oberseite des Probekörpers aufgeklebt ist. Durch den quadratischen Temperierkanal strömt das Kühlmedium (hier Wasser). Die Geometrie wurde unter Verwendung des additiven Fertigungsverfahrens des Elektronenstrahl-schmelzens hergestellt (EBM).

Die experimentellen Untersuchungen werden am selbstentwickelten Versuchsstand „Werkzeugtemperierung“ im Labor Thermodynamik und Wärmetechnik an der Hochschule Zittau/Görlitz durchgeführt. Die Anlage beinhaltet drei Messplätze zur Untersuchung der Geometrien mit unterschiedlichen Strömungsmedien (Wasser, Thermoöl, Luft). Durch verschiedene Sensorik erfolgt eine Bestimmung der wesentlichen wärme- und strömungstechnischen Größen (Druck, Differenzdruck, Massestrom, Temperatur, Wärmestrom etc.). Dabei werden verschiedene Probekörper mit quadratischen Kanälen, welche sich hinsichtlich der geometrischen Parametern Wand- und Kanalabstand unterschieden, vermessen. Die Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt des Versuchsstandes mit einem eingebauten Probekörper.

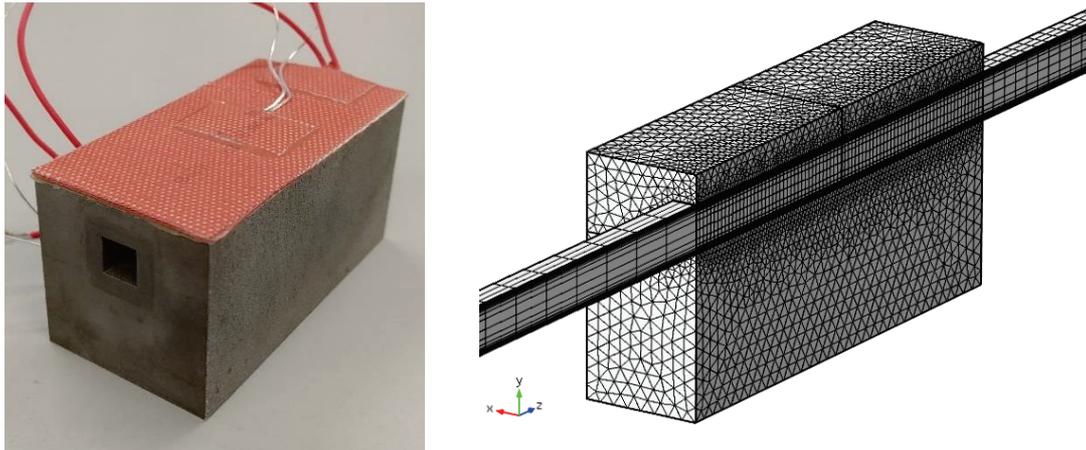


Abbildung 3: Exemplarische Darstellung betrachteter Geometrien. Links: Einheitszelle zur messtechnischen Untersuchung. Rechts: Ausschnitt eines numerischen Netzes zur gekoppelten Wärme- und Strömungstechnischen Simulation

Zielgrößen der Messungen sind dabei zum einen stationäre Wärmedurchgangswiderstände sowie das instationäre Verhalten beim Abkühlvorgang. Dazu wird das Wandtemperaturprofil über mehrere unmittelbar unter der Wand installierte Temperatursensoren gemessen. Die Charakterisierung erfolgt durch mittlere Wandtemperaturen sowie über die maximale Temperaturdifferenz auf der Wand (Inhomogenität der Wandtemperatur). Zur Verallgemeinerung der Ergebnisse werden die Daten im Zuge der Auswertung dimensionslos als Formfaktoren und Temperaturdifferenzverhältnisse betrachtet. Dies dient einer Übertragung der Erkenntnisse auf vergleichbare Anwendungsfälle durch Anwendung der Ähnlichkeitstheorie.

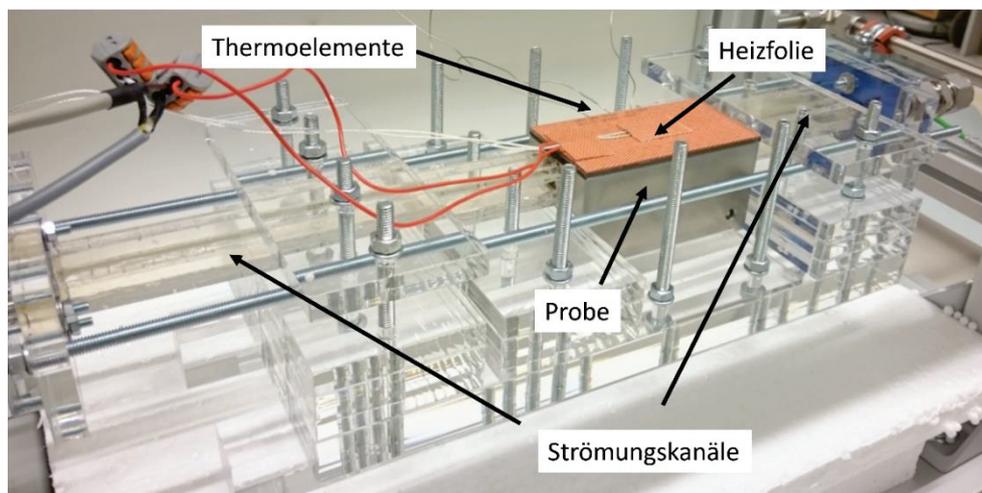


Abbildung 4: Probekörper integriert in den Versuchsstand

Die experimentellen Untersuchungen werden durch numerische Simulationen unter Verwendung von COMSOL MULTIPHYSICS ergänzt und erweitert. Dabei werden sowohl 2D-Berechnungen zur Untersuchung der reinen Wärmeleiteigenschaften derartiger Geometrien durchgeführt als auch 3D-Simulationen zur Betrachtung des gekoppelten

wärme- und strömungstechnischen Verhaltens. In **Abbildung 3** ist rechts das Rechengitter einer exemplarischen 3D-Geometrie unter Ausnutzung von Symmetriebedingungen dargestellt. Auch hier werden stationäre Wärmeleitwiderstände und Wandtemperaturdifferenzen sowie instationäre Verläufe der mittleren Wandtemperatur sowie der maximalen Wandtemperaturdifferenz bestimmt.

Die numerischen Ergebnisse werden durch die experimentellen Daten validiert. Die durch die Simulationen deutlich erweiterte Parametermatrix bildet als nächstes die Grundlage zur Ableitung eines halbempirischen Modells zur Bestimmung des instationären thermischen Verhaltens.

3. Entwicklung eines Modells zur Bestimmung des Abkühlverhaltens von Werkzeuggeometrien

Vor dem Hintergrund der Bestimmung von Abkühlzeiten bei der variothermen Werkzeugtemperierung erfolgt die Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der instationären Wärmeleitung in derartigen Einheitszellen. Ausgangspunkt ist dabei das bekannte Verfahren nach SCHLÜNDER (Schlünder, 1972) besonders in der durch MARTIN (Martin & Saberian, 1994) weiterentwickelten Form. Dabei erfolgt eine Erweiterung des 1D-Modells auf die zweidimensionale Kanalordnung innerhalb des segmentbezogenen Ansatzes auf Basis der stationären Wärmeleiteigenschaften. Die Berechnung des zeitlichen Verlaufes der Temperatur der Werkzeugwand T in dimensionsloser Form ($T_{F\infty}$... Temperatur des Kühlfluides, T_0 ... Anfangstemperatur der Werkzeugwand) kann dann beispielsweise über folgende Gleichung erfolgen:

$$\frac{T - T_{F\infty}}{T_0 - T_{F\infty}} = \exp \left[- \frac{Fo \delta}{V \left(\frac{1}{Bi A_a} + \frac{1}{Nu_i A_i} \right)} \right]$$

Das neue Modell beinhaltet dabei neben den klassischen Parametern Fläche A , Volumen V , dimensionslose Zeit Fo und dimensionsloser Wärmeübergang Bi auch Korrelationen zur Bestimmung des Geometrieparameters δ , der eine für die Kanalordnung charakteristische Länge für die Wärmeleitung beschreibt, sowie einer zeitabhängigen inneren Nußelt-Zahl Nu_i . Auch für die Beschreibung des Verlaufes der Inhomogenität der Wandtemperatur konnten dabei funktionelle Zusammenhänge erarbeitet werden. Die grundlegenden Korrelationen zur Bestimmung der Modellparameter basieren dabei auf dem umfangreichen Datensatz der experimentell validierten numerischen Simulationen.

4. Ergebnisse

In **Abbildung 5** sind exemplarisch die Ergebnisse der messtechnischen Bestimmung der dimensionslosen Formfaktoren der stationären Wärmeleitung im Vergleich zu einer Korrelation dargestellt. Die Korrelation stellt eine während der Arbeit entwickelte Anpassung der bekannten Gleichung von KUTATELADZE (Kutateladze & Borishanskii, 1966) dar. Da der Formfaktor nur die Wärmeleiteigenschaften der Geometrie berücksichtigt, ist eine Unabhängigkeit von der Reynolds-Zahl gegeben. Dies lässt sich auch messtechnisch gut bestätigen, was durch die nur geringfügige Schwankung der Werte innerhalb der mit der Messung verbundenen Unsicherheit deutlich wird. Die Messungen zeigen die Abhängigkeit der Wärmeleiteigenschaften von den geometrischen Parametern des Wand- und Kanalabstandes. Die aus diesen Werten und weiterführenden Simulationen

abgeleitete Korrelation dient der Bestimmung der charakteristischen Länge δ als Input-Parameter für das instationäre Modell.

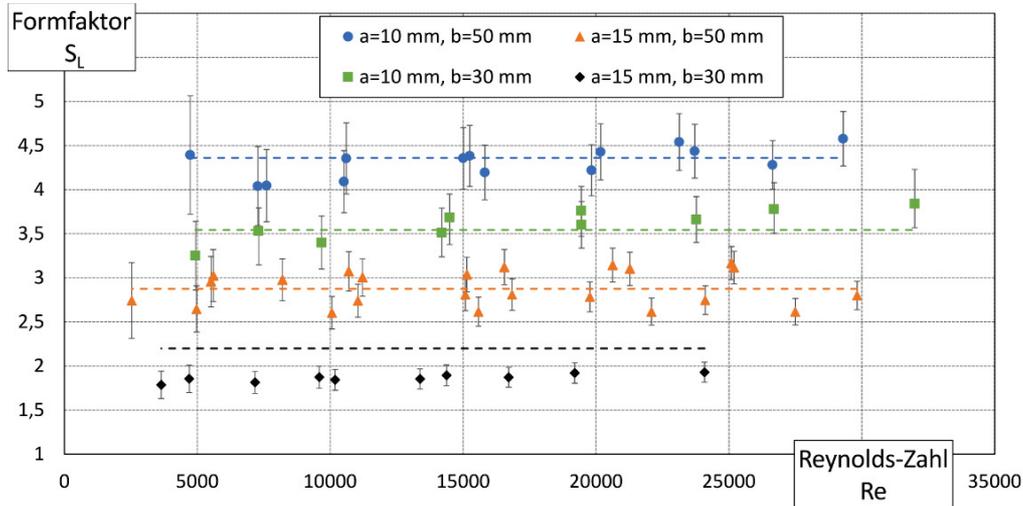


Abbildung 5: Dimensionslose Formfaktoren der Wärmeleitung (Symbole) für verschiedene Geometrien im Vergleich zur Korrelation (Strichlinien).

In der Abbildung 6 sind weiterhin exemplarische Ergebnisse für das Abkühlverhalten von vier verschiedenen Geometrien dargestellt. Die Temperierung erfolgte mit Wasser bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von jeweils 2 m/s. Abbildung 7 zeigt die dazugehörigen Verläufe der maximalen Differenz der Wandtemperatur. Dargestellt sind jeweils die Messdaten sowie die Ergebnisse der Simulationen und des entwickelten Modells.

Die Ergebnisse zeigen zum einen deutlich den Einfluss der geometrischen Parameter des Wand- und Kanalabstandes auf das instationäre thermische Verhalten der Geometrien. So ist eine Vergrößerung des Wandabstandes zwangsläufig mit einer Vergrößerung der Abkühlzeit verbunden, was auf die Zunahme der thermischen Masse zurückgeführt werden kann. Dasselbe gilt bei einer Zunahme des Kanalabstandes. Bzgl. der Inhomogenität der Wandtemperatur zeigt sich eine Vergrößerung bei abnehmendem Wand- und zunehmendem Kanalabstand.

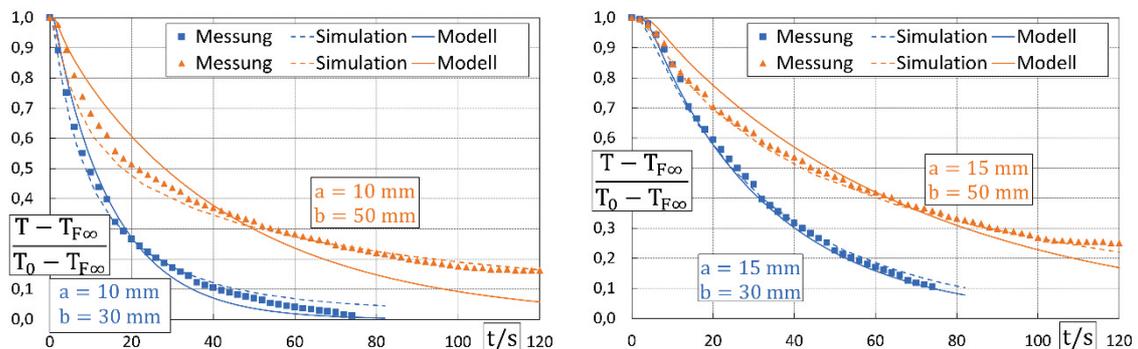


Abbildung 6: Exemplarische Darstellung der Ergebnisse für vier verschiedene Geometrien mit quadratischen Kanälen der Kantenlänge $d = 10\text{ mm}$. Die Abbildungen zeigen Messergebnisse des zeitlichen Verlaufs der dimensionslosen mittleren Wandtemperatur im Vergleich zu den Daten numerischer Simulationen und den Ergebnissen des entwickelten Berechnungsmodells.

Dies verdeutlicht das Optimierungsproblem bei der Kühlkanalauslegung, welches die quantitativen wie qualitativen Wärmetransporteigenschaften vor dem Hintergrund der Anforderungen an das Bauteil sowie an die Wirtschaftlichkeit gleichermaßen berücksichtigen muss. Weiterhin können sowohl der Wand- als auch der Kanalabstand aus mechanischen Gründen nicht beliebig klein gewählt werden. Auch vor dem Hintergrund der hydraulischen Eigenschaften ist bei einer Minimierung des Kanalabstandes zu bedenken, dass sich bei kleineren Abständen die Anzahl der Kanäle und damit der Strömungsweg vergrößert, was größere Druckverluste zur Folge hat.

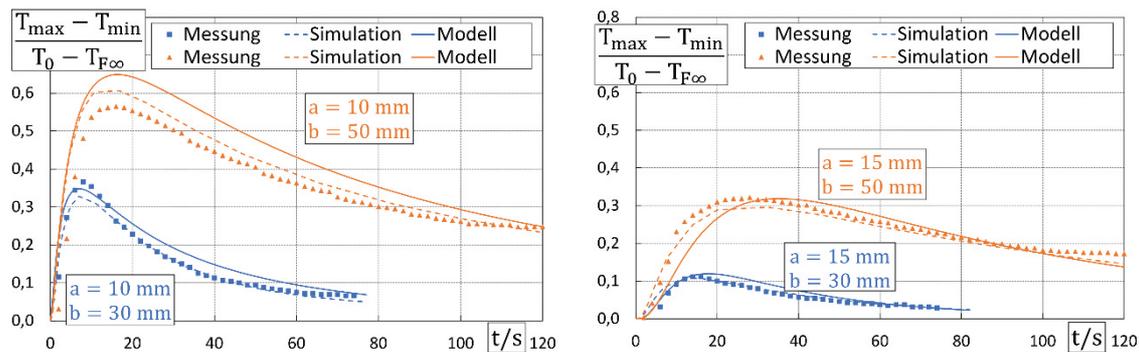


Abbildung 7: Exemplarische Darstellung der Ergebnisse für vier verschiedene Geometrien mit quadratischen Kanälen der Kantenlänge $d = 10 \text{ mm}$. Die Abbildungen zeigen Messergebnisse des zeitlichen Verlaufs der dimensionslosen maximalen Wandtemperaturdifferenz im Vergleich zu den Daten numerischer Simulationen und den Ergebnissen des entwickelten Berechnungsmodells.

Vor dem Hintergrund der Modellvalidierung zeigt sich eine gute Anwendbarkeit des instationären Modells bzw. der hergeleiteten Gleichungen. So können sowohl der Abkühlverlauf als auch die Temperaturinhomogenität in einer durch Strömungskanäle temperierten Werkzeugwand als Funktion der Zeit zufriedenstellend auch ohne fundierte wärmetechnische Ausbildung (z.B. durch einen Werkzeugbauer) bestimmt werden. Die Genauigkeit verbessert sich dabei mit zunehmendem Wand- und abnehmendem Kanalabstand, was auf damit verbundene kleinere Temperaturgradienten bzw. homogenere Temperaturfelder innerhalb der Werkzeuge zurückgeführt werden kann.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeit konnten erfolgreich wichtige Grundlagen zur Auslegung von Temperierkanälen in variothermen Verfahren mit dem Fokus auf wärmetechnisch günstigere quadratische Kanäle hergeleitet werden. Zunächst erfolgte eine Anpassung der Korrelation zur Bestimmung der stationären Wärmeleiteigenschaften derartiger Geometrien. Weiterhin wurde experimentell wie numerisch eine breite Datenbasis zur Beschreibung des instationären Verhaltens derartiger Geometrien geschaffen.

Darauf aufbauend konnte ein halbempirisches, instationäres Modell zur Beschreibung des Abkühlverhaltens und der Inhomogenität der Wandtemperatur hergeleitet werden. Dieses Modell erweitert bestehende 1D-Ansätze zur Berücksichtigung sowohl des Kanal- als auch des Wandabstandes. Es wurde eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit Messdaten und numerischen Simulationsergebnissen festgestellt.

Das entwickelte Modell ermöglicht die schnelle und einfache Bestimmung der instationären quantitativen wie qualitativen Wärmetransporteigenschaften. Praktisch tätige Ingenieure werden dadurch in die Lage versetzt, vor dem Hintergrund der Auslegung von

Temperierkanälen in variothermen Verfahren optimale Kanalanordnungen zu entwickeln. Das Modell fügt sich dabei nahtlos in bestehende Auslegungsgrundlagen ein und erweitert diese. Neben den praktischen Vorteilen bedeutet dies auch eine Erweiterung der thermodynamischen Grundlagen zur instationären Wärmeleitung.

Zur Auslegung komplexerer Geometrien ist weiterhin die Bestimmung plausibler Startwerte für die auf numerischen Simulationen und Optimierungsverfahren basierende iterative Auslegung möglich. Dadurch ist eine Reduzierung der erforderlichen Iterationsschritte und somit eine Minimierung des Berechnungsaufwandes gegeben.

Die Vorgehensweise der Herleitung kann dabei als Ausgangspunkt zur Übertragung des Modells auf andere mehrdimensionale Geometrien und Parameterbereiche dienen. Beispielsweise ist eine Erweiterung auf rechteckige Geometrien (unterschiedliche Kanalhöhe und -breite) denkbar.

Literaturverzeichnis

Faßnacht, P. (2014). *Algorithmische Auslegung von konturnahen Temperiersystemen in Spritzgießwerkzeugen durch ein hybrides System aus naturalogenen Verfahren (Dissertation)*. Leibniz Universität Hannover.

Hopmann, C., Menges, G., Michaeli, W., & Mohren, P. (2018). *Spritzgießwerkzeuge: Auslegung, Bau, Anwendung*. München: Carl Hanser Verlag.

Jansen, S. (2014). *Generative Fertigung von konturnah temperierten Werkzeugen mittels Selective Laser Melting (Dissertation)*. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

Kanbur, B. B., Suping, S., & Duan, F. (2020). Design and optimization of conformal cooling channels for injection molding: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 3253–3271.

Kazmer, D. (2016). *Injection mold design engineering*. München: Carl Hanser Verlag.

Kutateladze, S. S., & Borishanskii, V. M. (1966). *A concise encyclopedia of heat transfer*. Oxford: Pergamon Press.

Martin, H., & Saberian, M. (1994). Improved asymptotic approximations for transient conduction and diffusion processes. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 205–210.

Schlünder, E.-U. (1972). Über die Brauchbarkeit des Newtonschen Abkühlungsgesetzes im Lichte der Fourierschen Wärmeleitungstheorie. *Wärme- und Stoffübertragung*, 9-14.

Zöllner, O. (1999). *Optimierte Werkzeugtemperierung*. Leverkusen: Bayer AG.