

Messung und Modellierung des Wärmetransportes bei Formgebungsprozessen

D. Höhne, M. Merkwitz, B. Pitschel
 Institut für Silikatechnik der TU Bergakademie Freiberg

Bei der Formgebung heißen Glases spielen nicht nur die thermischen Anfangsbedingungen und die Stoffeigenschaften von Glas eine große Rolle, sondern auch die Kontaktverhältnisse zwischen Glas und Metall. Durch den intensiven Kontakt zwischen Glas und Form wird dem Glas Wärme entzogen und es erhält seine Formstabilität. Dabei sind die Temperaturverhältnisse in der Kontaktzone entscheidend für das Aussehen der Glasoberfläche.

In Hinblick auf die Verbesserung der Oberflächenqualität ist es erforderlich, verfahrenstechnische Parameter mittels verlässlicher Meßgrößen festzulegen, um besser steuerbare und vor allem reproduzierbare mechanische Abläufe in der Maschine zu erzielen bzw. fehlerbehaftete Produkte frühzeitig zu erkennen. Untersuchungen zum Vorformprozeß beim Preß-Blas-Verfahren haben gezeigt, daß die Festigkeit der Behälter durch die Pegeltemperatur beeinflusst wird. Das läßt den Schluß zu, daß Oberflächenschädigungen bei der Rückerwärmung nicht vollständig ausheilen und auf die Festigkeit Einfluß nehmen. Folglich existiert ein Temperaturfeld für die Formgebung im Kontakt mit Werkzeugen, welches durch das Kleben der Glasschmelze an der Form, durch die Bildung von Rissen sowie durch die Ausbildung von Fließwellen begrenzt wird. Abbildung 1 zeigt diesen Temperaturbereich anhand der Ergebnisse von Kluge (1989) für das Verpressen optischer Gläser.

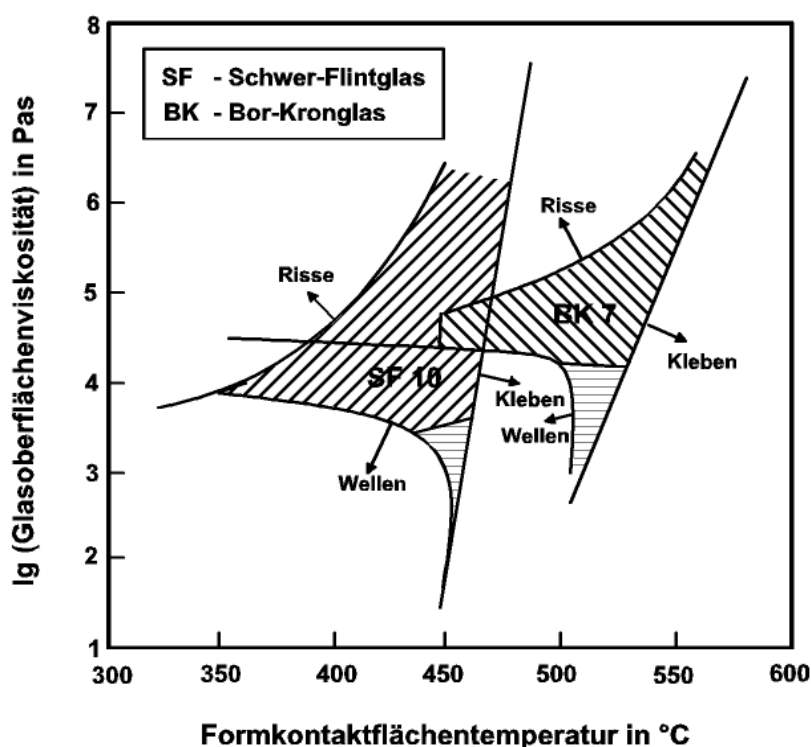


Abbildung 1: Arbeitsfelder für das Verpressen optischer Gläser, nach Kluge (1989)

Obwohl beim Pressen höhere Kräfte und größere Fließlängen als bei den Blasprozessen auftreten, kann davon ausgegangen werden, daß die Aussagen grundsätzlich auch für die Hohlglasherstellung gelten. Es ist also notwendig, die Temperaturen im Werkzeug und in der Form so zu gestalten, daß während der gesamten Zeit des Werkzeug-Glas-Kontaktes das Verarbeitungsfenster eingehalten wird. Dieser Aspekt tritt um so mehr in Erscheinung, je leichter die Erzeugnisse bei gleichem Volumen und ausreichend hoher Festigkeit werden sollen.

Die Charakterisierung der Wärmetransportmechanismen im Formgebungsprozeß beinhaltet sowohl den Wärmetransport im Glas durch Leitung und Strahlung als auch den Wärmeübergang zwischen Glas und Umgebung sowie reine Wärmeleitungsvorgänge in der Form. Während zur mathematischen Beschreibung des Wärmetransportes in der Form ausreichend genaue und numerisch umsetzbare Modelle vorliegen, bereitet die Beschreibung des Wärmetransportes durch Strahlung innerhalb des Glases erhebliche Schwierigkeiten aufgrund der Wellenlängen- und Temperaturabhängigkeit des Absorptionskoeffizienten. Die relevanten physikalischen Größen, die bei der Wärmestrahlung von Bedeutung sind, werden durch die Gesetze von Planck, Stefan-Boltzmann, Wien und Kirchhoff beschrieben.

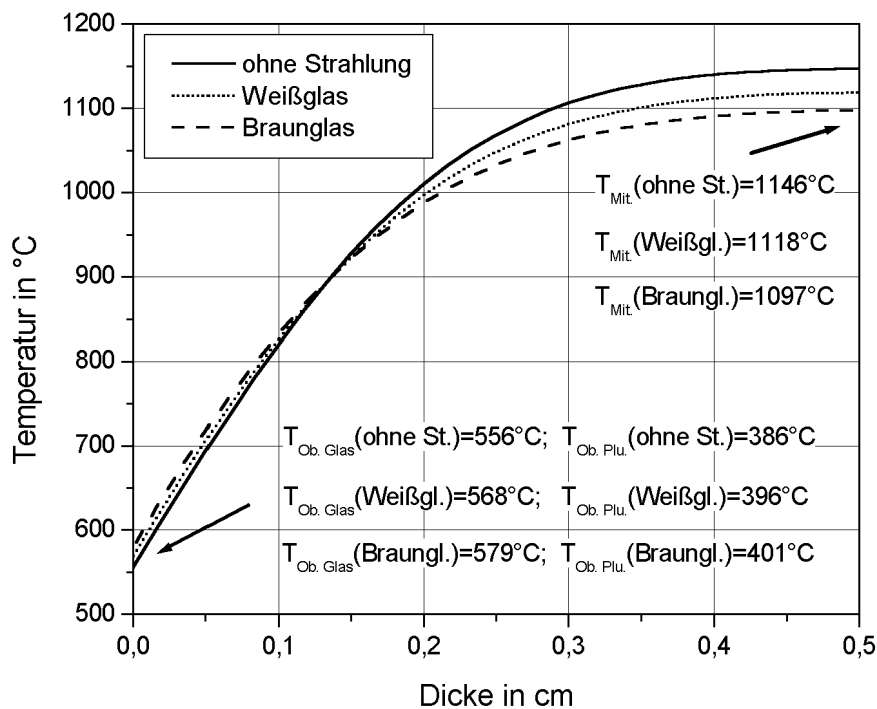


Abbildung 2: Temperaturprofile für die Hohlglasformgebung von Weiß- und Braunglas nach einer Zeit von 3 s, aus Merkwitz et al. (2000)

Während der Einfluß der Strahlung auf den Wärmetransport im Formgebungsprozeß bei freier Abkühlung unbestritten ist und z. B. bei der Flachglasherstellung zur Steigerung der Ziehleistung sowie zur Stabilisierung der Produktion zur Anwendung gelangt, wird der Einfluß der Strahlung beim Formen mit Werkzeugkontakt gegenüber dem Wärmetransport durch Leitung oftmals als vernachlässigbar

eingeschätzt. Diese Aussage ist unter bestimmten Umständen gerechtfertigt, jedoch nicht für den gesamten Formgebungsbereich zu verallgemeinern. Modellrechnungen von Merkwitz et al. (2000) belegen, daß die Strahlung nicht nur erheblich zur integralen Abkühlung des Glases während eines mehrstufigen Formgebungsprozesses beiträgt, sondern auch Rückerwärmungs- und Rückkopplungseffekte die Oberflächentemperatur sogar während eines leitungsdominierten Prozessschrittes in Abhängigkeit unterschiedlicher Absorptionseigenschaften beeinflussen.

Beispielsweise kühlt ein Braunglas mit einer Wanddicke von mehreren Millimetern in der Mitte stärker als ein Weißglas gleicher Dicke ab. Im Gegensatz dazu kann die Oberflächentemperatur von Braunglas höher als beim Weißglas sein. In Abbildung 2 sind die unter Berücksichtigung von Leitung und Strahlung berechneten Temperaturprofile, die sich bei der Hohlglasformgebung von Weiß- und Braunglas nach einer Zeit von 3 s ergeben, veranschaulicht. Die innerhalb der Temperaturprofile zu beobachtenden Unterschiede zeigen einerseits den Anteil der Strahlung am Wärmetransportregime sowie andererseits den merklichen Einfluß unterschiedlicher Absorptionseigenschaften des Glases. So ist die aus dem Inneren des Braunglases emittierte Strahlung aufgrund des höheren Absorptionskoeffizienten und folglich des höheren Emissionskoeffizienten größer als beim Weißglas, was auch für die Absorption der Randschicht zutrifft. Wegen der geringen Oberflächentemperatur ist jedoch die Emission der Randschicht sowohl für Braun- als auch für Weißglas vernachlässigbar.

Neben den Problemen bei der Beschreibung des Wärmetransportes durch Strahlung im Glas existieren nur ungesicherte Erkenntnisse über den Wärmetransport zwischen Glas und Umgebung. Dieser Wärmetransport läßt sich in einen Strahlungsanteil und einen Anteil, der durch einen Wärmeübergangskoeffizienten beschrieben wird, aufspalten. Es ist bekannt, daß sich der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Glas und Form infolge von Wärmedehnungsunterschieden und eines zunehmenden Übergangswiderstandes mit der Kontaktzeit bzw. der Abkühlung des Glases verringert.

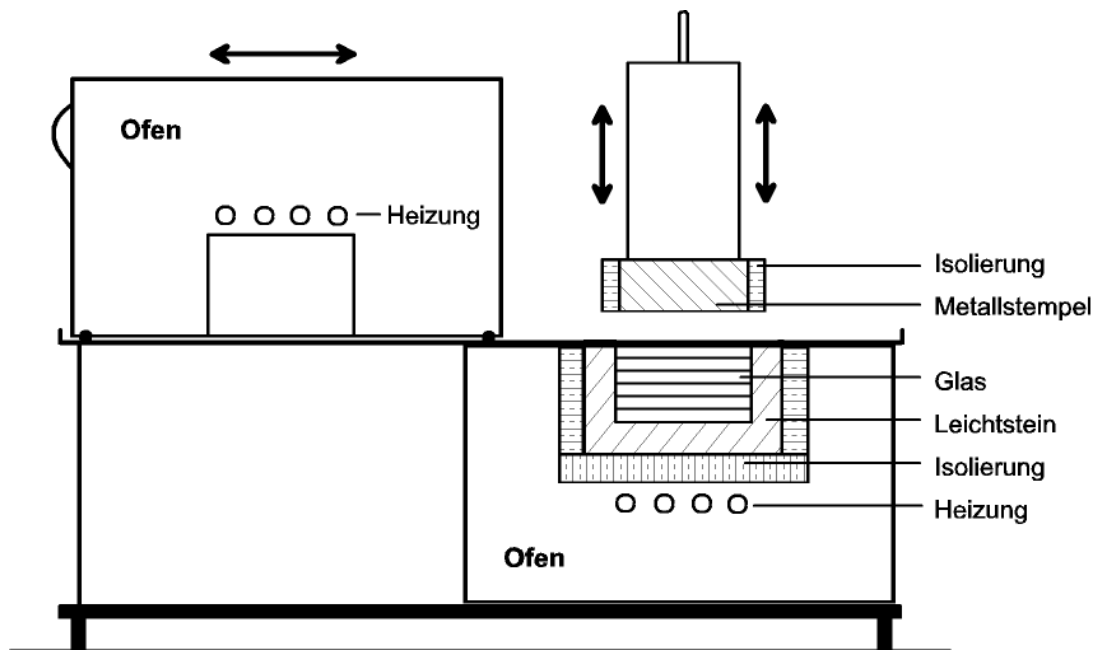


Abbildung 3: Versuchsanordnung zur Untersuchung des Wärmetransportes zwischen Glas und Metall

Die meßtechnische Erfassung des Wärmetransportes erfordert die zeitabhängige Ermittlung der Temperaturfelder im Glas und in der Form sowie die direkte Bestimmung der Glasoberflächentemperatur im Werkzeugkontakt. Da eine direkte Oberflächentemperaturmessung infolge des vorhandenen Gradientenfeldes praktisch kaum realisierbar ist und eine zusätzliche Störung des Temperaturfeldes mit sich bringt, werden zur Temperaturmessung im Glas sowie in der Form eingebettete Thermolemente herangezogen. Mit Hilfe der Erfassung des zeitlichen Temperaturverlaufes möglichst nahe der Kontaktfläche zwischen Glas und Metall ist es möglich, neben Aussagen zur Zeitabhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten auf die Oberflächentemperatur des Glases anhand von in der Form gewonnenen Wärmeströmen zu schließen.

Da jedoch der Wärmeübergangskoeffizient kein einfacher Stoffwert, sondern eine Funktion der Materialeigenschaften und des in der Nähe der Grenzfläche vorliegenden Temperaturfeldes ist, muß die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten anhand von Versuchen erfolgen. Die zur Ermittlung des Temperaturverlaufes beim Kontakt zwischen Glas und Form verwendete Versuchsanordnung ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt, während Abbildung 4 die Anordnung der Thermolemente in der aus hochlegiertem Stahl vom Typ X10CrNiS18.9 gefertigten Metallform zeigt. Die in der Metallform sowohl vertikal als auch horizontal verlaufenden Bohrungen dienen zur Aufnahme der Mantelthermolemente vom Typ NiCr-Ni mit einem Außendurchmesser von 0,5 mm, wobei mittels einer Einlötlung der Thermolemente die thermische Ankopplung an die Form sichergestellt wird.

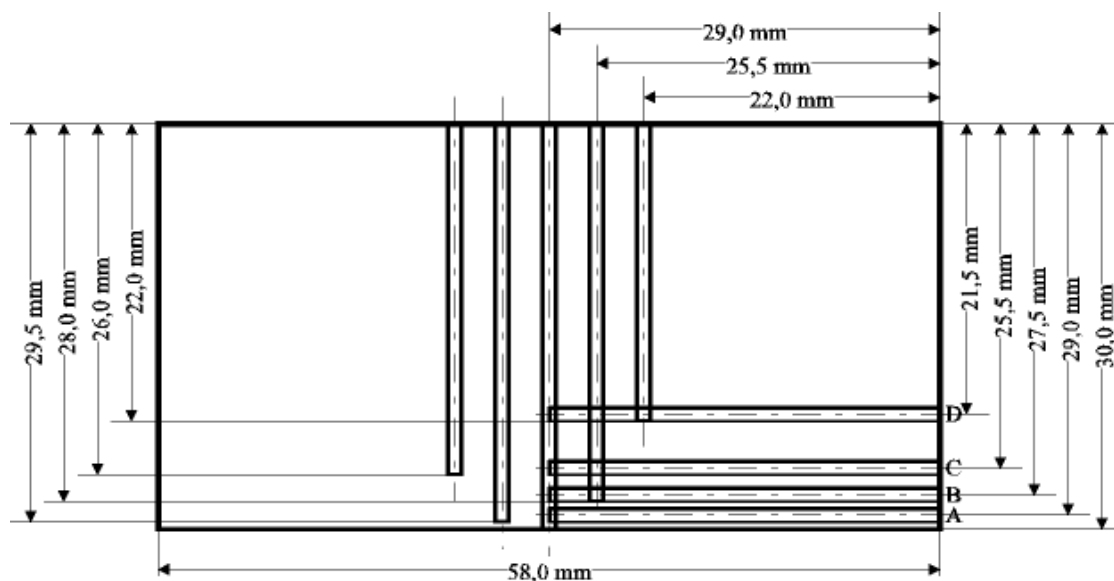


Abbildung 4: Anordnung der Thermolemente in der Metallform (Seitenansicht)

Zur Ermittlung des Temperaturfeldes im Glas werden Glasscheiben verschiedener Dicke und unterschiedlicher Strahlungseigenschaften in einer Leichtsteinform übereinander geschichtet und Thermolemente vom Typ NiCr-Ni in eingeschliffene Vertiefungen eingelegt. Um den Einfluß der Leitfähigkeit des Glases auf die Temperaturmessung mit nichtisolierten Thermodrähten abschätzen zu können,

werden verschiedene geometrische Anordnungen der Thermoelemente innerhalb des Glases mittels Experimenten überprüft. Die in der Glasschmelze gemessenen Temperaturkurven, die in Abbildung 5 graphisch veranschaulicht sind, bilden sich bei dem durchgeführten Versuch nahezu deckungsgleich aufeinander ab. Nur im Temperaturbereich oberhalb von 1100°C lassen sich in der Abbildung geringfügige Abweichungen im Kurvenverlauf feststellen, während eine Beeinflussung des Temperaturfeldes im interessierenden Meßbereich nicht aufzeigbar ist.

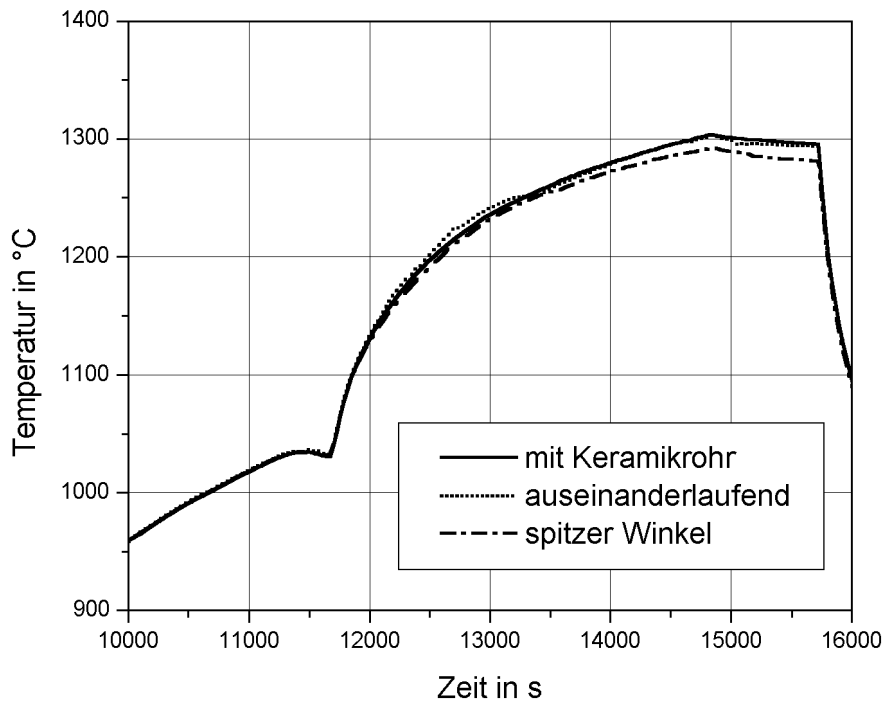


Abbildung 5: Temperatur-Zeit-Abhängigkeit im Glas bei verschiedenen Thermoelementanordnungen

Nach einer Kalibrierung der Thermoelemente in der Metallform, bei der sich im allgemeinen lineare Zusammenhänge entsprechend der Thermoelementcharakteristik der Thermopaare vom Typ NiCr-Ni für das betrachtete Intervall von 20°C bis 450°C einstellen, wird mittels erster Untersuchungen zur Erfassung des Temperaturverhaltens beim Kontakt von Glas und Metall der Temperaturengleich anhand von Abkühlungskurven des Glases bzw. Aufheizkurven der Metallform aufgenommen. Die Versuche werden zunächst an Floatglasproben mit einer chemischen Zusammensetzung von 72,3% SiO₂, 13,6% Na₂O, 8,75% CaO, 4,07% MgO, 0,79% Al₂O₃, 0,07% Fe₂O₃, 0,25% K₂O und 0,14% SO₃ durchgeführt. Dabei werden sowohl die Anfangstemperaturen der Glasschmelze als auch der Metallform variiert.

Aus den Meßreihen werden Unterschiede sowohl in der Form der Temperaturkurven als auch in der Temperaturdifferenz bezüglich der Anfangsdaten deutlich. Mit steigender Temperaturdifferenz zwischen Glas und Werkzeug werden die Temperaturgradienten an der Kontaktzone immer größer.

Daraus wird auch sichtbar, daß die Bestimmung der wahren Temperaturen an der Kontaktzone, d. h. die Glas- und Werkzeugoberflächentemperaturen, nur schwer ausführbar ist.

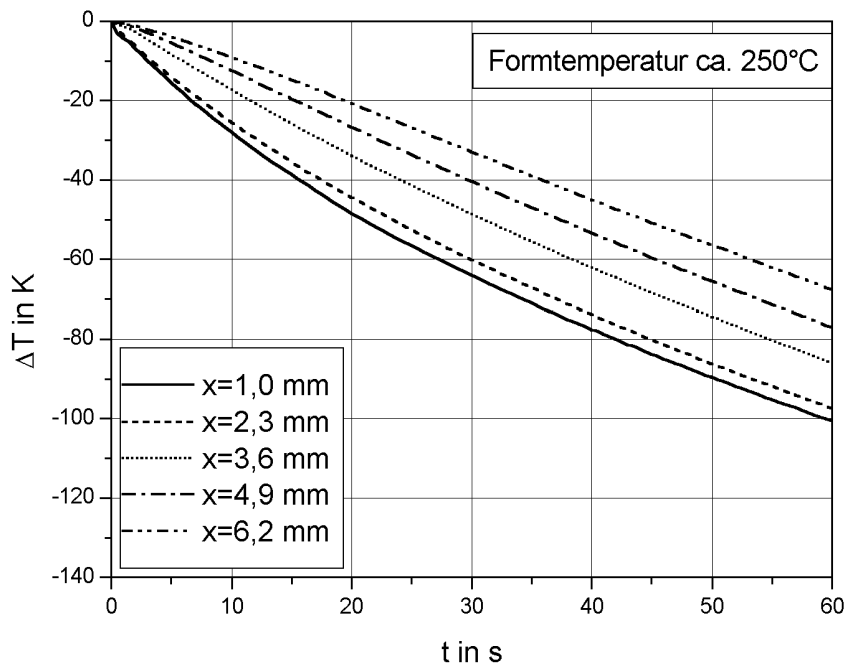


Abbildung 6: Abkühlungskurven des Glases für eine Anfangstemperatur von 800°C beim Formkontakt in Abhängigkeit von der Meßtiefe

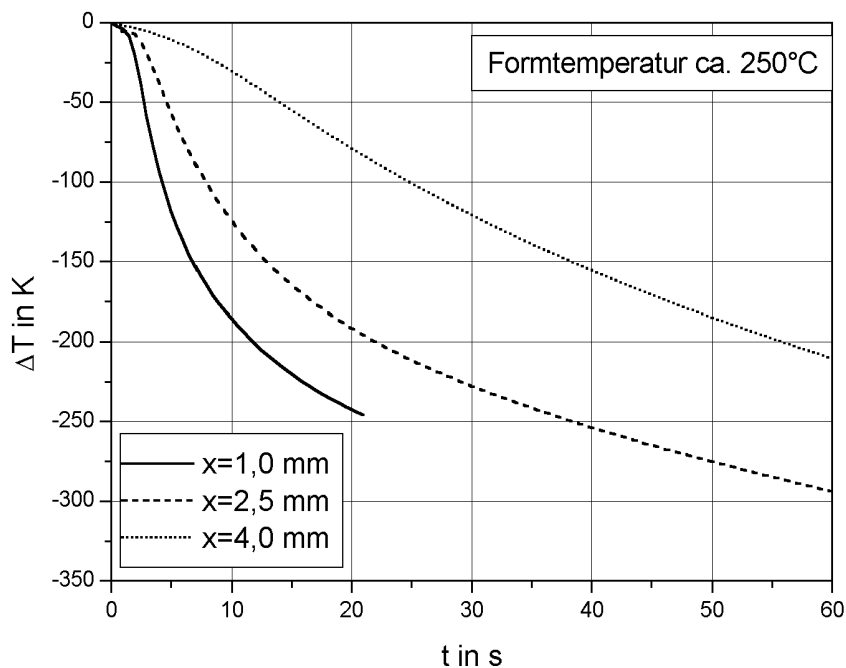


Abbildung 7: Abkühlungskurven des Glases für eine Anfangstemperatur von 900°C beim Formkontakt in Abhängigkeit von der Meßtiefe

Abbildung 6 zeigt als Beispiel den Abfall der Temperatur im Glas in verschiedenen Tiefen nach dem Kontakt mit der Form bei einer Anfangstemperatur des Glases von 800°C und der Form von 250°C. Es ergibt sich ein fast linearer Verlauf während der Kontaktzeit von 60 s. Abbildung 7 veranschaulicht den Temperatur-Zeit-Verlauf für eine Glasanfangstemperatur von 900°C. In diesem Fall läßt sich ein steilerer Abfall der Temperatur an der Oberfläche nach dem Formkontakt erkennen. Der Temperaturverlauf am Anfang des Formkontaktes weist darauf hin, daß das Aufsetzen der Form auf das Glas präzise erfolgen muß. Da der Temperaturgradient zur Oberfläche hin stark zunimmt, ist es erforderlich, Thermoelemente mit einem möglichst geringen Durchmesser einzusetzen.

In die Metallform werden Mantelthermoelemente mit freier Perle in vertikale und horizontale Bohrungen eingelötet, wobei das Lötmetall einen guten Wärmekontakt gewährleisten soll. Abbildung 8 zeigt die Temperaturerhöhung, die in der Metallform bei einer Anfangstemperatur von ca. 300°C sowie einer Glasanfangstemperatur von 900°C erhalten wird. Dabei wird eine weitgehende Übereinstimmung für beide Einbauarten festgestellt. Für die horizontalen Bohrungen ergeben sich jedoch größere Unsicherheiten bei der Bestimmung des Abstandes der Meßstelle von der Oberfläche, da nicht ermittelt werden kann, in welcher Position der Bohrung sich die Perle tatsächlich befindet. Bei den vertikalen Bohrungen kann gesichert werden, daß die Meßstelle den Boden der Bohrung berührt. Außerdem ist durch die Auswahl des Lötmaterials sicherzustellen, daß keine Beeinträchtigung der Temperaturmessung durch das Schmelzen des Lotes im zu untersuchenden Temperaturbereich erfolgt. Aus der Erwärmung der Form wird die Wärmemenge, die nach dem Kontakt übertragen wird, in Abhängigkeit von der Zeit ermittelt.

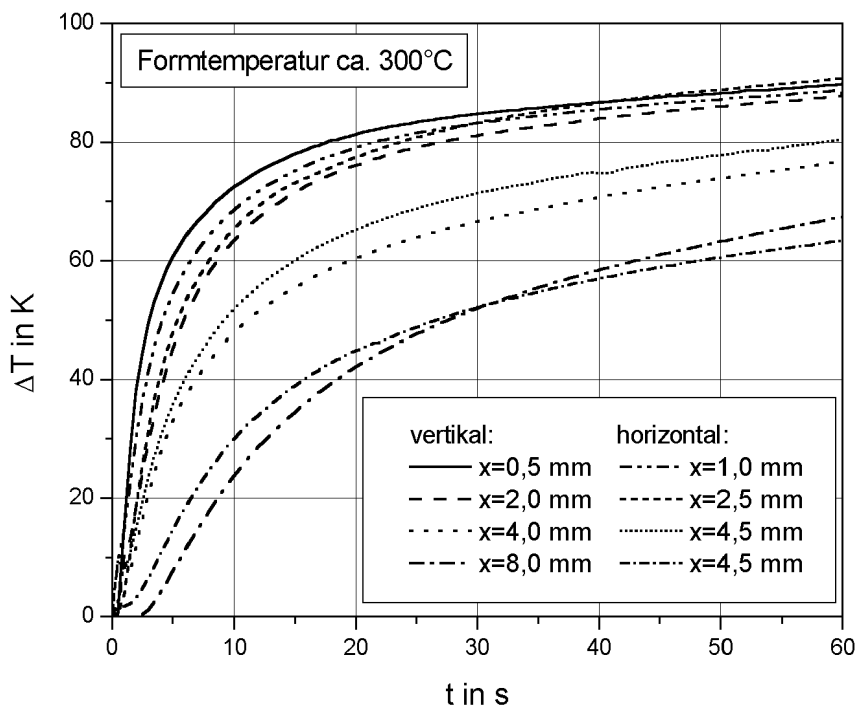


Abbildung 8: Aufheizkurven der Form für eine Anfangstemperatur von ca. 300°C beim Glaskontakt mit einer Anfangstemperatur von 900°C in Abhängigkeit von der Meßtiefe

Im Fortlauf der Projektbearbeitung müssen noch weitere Einflußgrößen auf die Wärmeübertragung zwischen Glas und Form wie Materialeigenschaften und Oberflächenbeschaffenheit der Formwerkzeuge berücksichtigt werden. Zur Erfassung des Einflusses des Formmaterials auf die Glasformgebung sollen neben dem bisher zum Einsatz kommenden Stahlwerkzeug auch Gußwerkstoffe verschiedener Qualitäten, z. B. R-26 und R-40, bei der Versuchsdurchführung herangezogen werden. Darüber hinaus zielen die weiteren Arbeiten auf die Ermittlung von Temperaturprofilen im Glas in Abhängigkeit von den Strahlungseigenschaften, wozu Temperaturmessungen sowohl mittels Pyrometern als auch mit sehr feinen Thermoelementen, die sich durch eine extrem kleine Meßfläche auszeichnen, durchgeführt werden sollen. Um letztlich verlässliche Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Glas und Form aus den gemessenen Temperaturdaten in Abhängigkeit von der Zeit, der Glasfarbe, der Oberflächenqualität der Formwerkzeuge und des Anpreßdrucks ableiten zu können, müssen gesicherte und vor allem reproduzierbare Bedingungen beim Glas-Form-Kontakt gewährleistet sein.

Diese Arbeit beschreibt erste Ergebnisse, die bei der Bearbeitung des von der HVG geförderten AiF-Vorhabens Nr. 12723 BR „Messung und Modellierung des Wärmetransportes bei Formgebungsprozessen unter besonderer Berücksichtigung der Wärmeübergangskoeffizienten und des Wärmetransportes durch Strahlung“ erhalten wurden.

Literatur

- [1] Kluge, W. D., „Ein Beitrag zum Kontaktverhalten von Glas mit Formgebungswerkzeugen“, Diss., Sektion Verfahrenstechnik und Silikatechnik, Bergakademie Freiberg, 1989
- [2] Merkwitz, M., Zimmermann, H., Endrys, J., „The influence of wavelength and temperature dependent absorption coefficient on radiative heat transfer in glass forming processes“, Glass Sci. Technol. 73 (2000)
- [3] Weichert, L. et al., „Temperaturmessung in der Technik“, Expert Verlag GmbH, Ehningen bei Böblingen, 1992
- [4] Jones, S. P., „Faktoren, die den Glasformgebungsprozeß beeinflussen“, Glastechn. Ber. 44 (1971)