

HVG-Mitteilung Nr. 2035

Messung und Modellierung des Wärmetransportes bei Formgebungsprozessen unter besonderer Berücksichtigung der Wärmeübergangskoeffizienten und des Wärmetransportes durch Strahlung

D. Höhne, B. Pitschel, M. Merkwitz, R. Löbig,
Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik, TU Bergakademie Freiberg,

Vortrag im Fachausschuss IV der DGG am 25. März 2003 in Würzburg

Einleitung

Bei der Formgebung von heißem Glas mit Formwerkzeugen spielen neben den thermischen Anfangsbedingungen und Stoffeigenschaften auch die Kontaktverhältnisse zwischen Glas und Form eine bedeutende Rolle. Durch den intensiven Kontakt wird dem Glas Wärme entzogen und es erhält seine Formstabilität. Dabei sind die Temperaturverhältnisse in der Kontaktzone entscheidend für die Qualität der Glasoberfläche. Es konnte nachgewiesen [1, 2] werden, dass man nur in einem bestimmten Bereich der Viskosität der Gläser an der Oberfläche beim Werkzeugkontakt eine gute Oberflächenqualität erreichen kann. Die zulässigen Kontakttemperaturen sind von der Glasart abhängig, da die Viskosität auch von der Zusammensetzung abhängig ist. Es ergibt sich für jedes Glas ein zulässiger Bereich für die Kontakttemperatur.

Der Wärmetransport im Glas wird durch Leitung und Strahlung bestimmt. Während bei der freien Formung der Einfluss der Strahlung unbestritten ist, wird sie bei der Formgebung mit Formenwerkzeugen meist vernachlässigt. Die Arbeit hat das Ziel abzuschätzen, welchen Beitrag die Strahlung auf den Wärmetransport und die Glastemperaturen besitzt und in welcher Weise das für die Verbesserung der Fertigung genutzt werden kann. Das Glas ist ein Volumenstrahler, d.h. die Strahlung kommt aus dem Inneren, wobei das Emissionsvermögen von der optischen Dicke abhängt. Modellrechnungen [3] 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 von unterschiedlichen Absorptionseigenschaften beeinflussen.

Versuchsdurchführung

Die Messung des Wärmetransportes erfordert die zeitabhängige Ermittlung der Temperaturfelder im Glas und im Werkzeug. Da eine direkte Messung der Oberflächentemperatur 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 verwendet. Die 60 mm x 60 mm großen Glasproben mit einer Dicke von 10 mm wurden in Isolierstein mit sehr hoher Porosität eingebettet, um eine Verformung der Glasprobe beim Aufsetzen des Werkzeuges zu verhindern und um den Wärmeaustausch über die Seiten und den Boden gering zu halten.

Der Ofen des Versuchstandes besteht aus einem Ober- und Unterteil (Bild 1). Die Versuchsbedingungen wurden so gewählt, dass ein Praxisbezug möglich ist. Bei den Versuchen kamen drei in der Glasindustrie gebräuchliche Formwerkstoffe, der hochlegierte Stahl X10CrNiS18.9 und die Gusswerkstoffe R-26 (Lamellengraphit) und R-

40 (Kugelgraphit) zum Einsatz. Um den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit der Werkzeuge als Parameter erfassen zu können, wurden aus jedem Gusseisenmaterial 3 Stempel mit unterschiedlicher Oberflächenrauheit gefertigt. Es wurden Weißglas und Braunglas sowie zum Vergleich Schwarzglas im Versuchsstand untersucht.

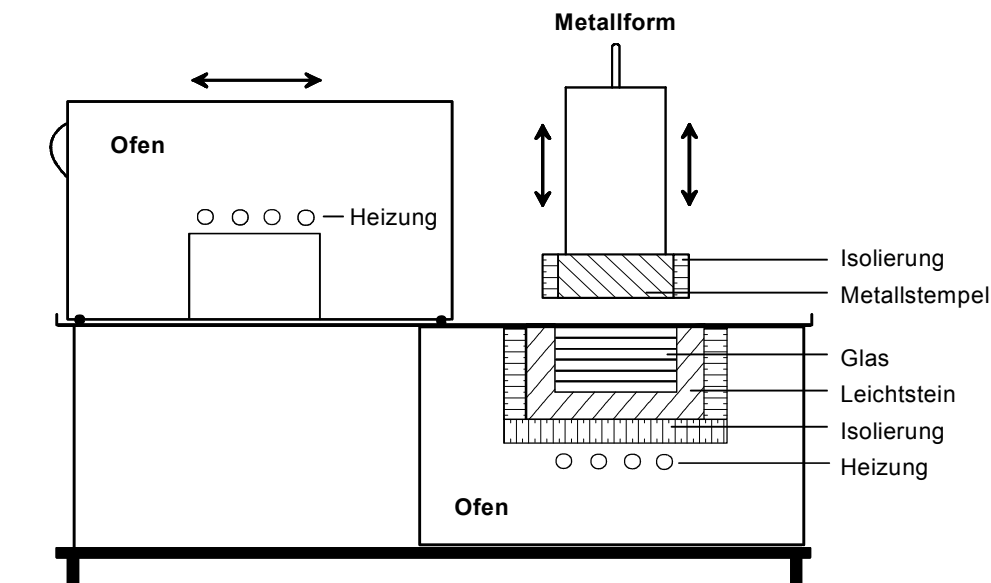


Bild 1: Schematische Darstellung des Versuchsstandes.

Experimentelle Ergebnisse

Die Glasfarbe, d.h. der Absorptionskoeffizient im Bereich von 0,2 bis 5 μm ist verantwortlich für die Strahlung im Glas und deren Wechselwirkung mit der Umgebung. Stellvertretend für die durchgeführten Versuche ist die Erwärmung des Stempels R-40/200 nach dem Kontakt mit den Gläsern in Bild 2 dargestellt. Die Formoberflächentemperaturen ergeben bei allen sieben im Versuchsstand eingesetzten Stempeln die gleiche Reihenfolge. Braunglas gibt mehr Wärme ab als Weißglas und Schwarzglas.

Die Beträge der Wärmestromdichten von Braun- und Weißglas beim Kontakt mit X10CrNiS18.9 differieren bis zu 15 Prozent. Die Übertragung der größten Wärmestromdichten erfolgt unmittelbar nach dem Kontakt zwischen Werkzeug und Glas.

Die Eigenschaften der Formwerkstoffe sowie die Rautiefe der Werkzeugoberflächen sind ebenfalls von großer Bedeutung. Mit steigender Wärmeleitfähigkeit nimmt die Form schneller und damit in der Kontaktzeit mit dem Glas mehr Wärme auf. Es wird deutlich, dass mit zunehmender Rautiefe die Formoberflächentemperatur nicht so stark steigt, also der Wärmetransport beeinflusst wird (Bild 3). Mittels der praktischen Untersuchungen am Versuchsstand konnte der Strahlungstransport im Hinblick auf die verwendeten Glasproben eingegrenzt werden. Lokale Temperaturunterschiede bei der Formgebung von Weiß- und Braunglas sind auf den spektralen Absorptionskoeffizienten zurückzuführen. Die Stempeloberfläche erreicht die höheren Temperaturen, und damit die höheren Wärmestromdichten beim Kontakt mit Braunglas.

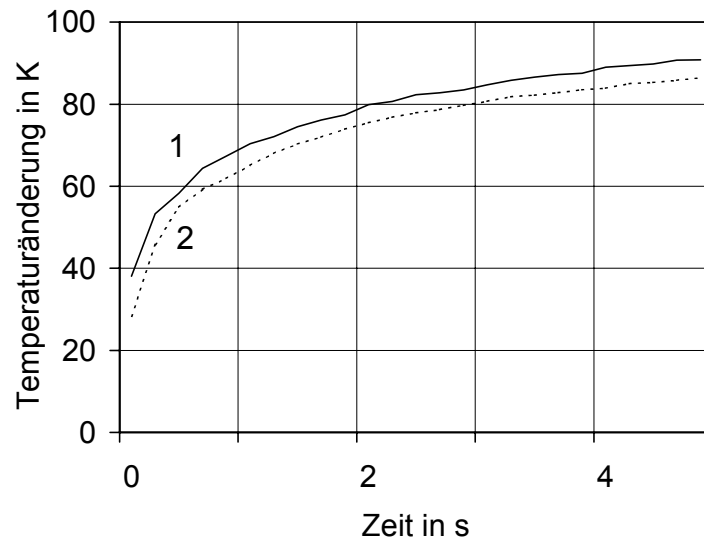


Bild 2: Temperatur an der Formoberfläche als Funktion der Zeit Materials R-40/200 im Kontakt mit Braunglas(1) und Weißglas (2).

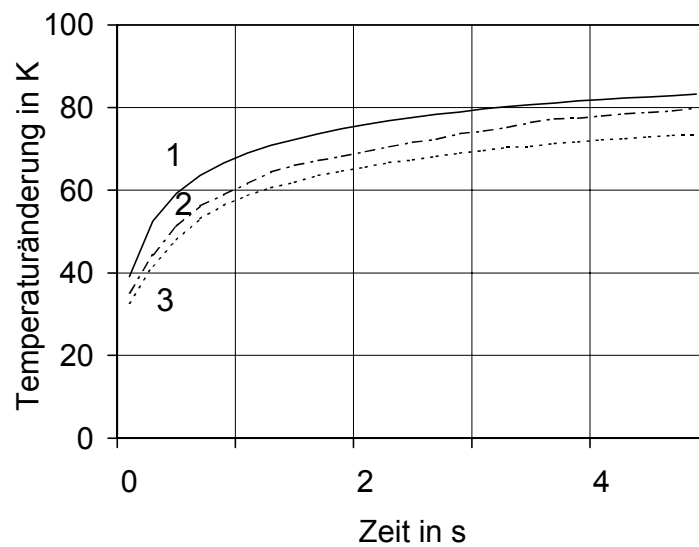


Bild 3: Temperatur der Formoberfläche als Funktion der Zeit, Material R-26 im Kontakt mit Weißglas 1 - R-26/400 (0,80 μm), 2 - R-26/200 (3,08 μm), 3 - R-26/80 (5,44 μm).

Die Messung des Temperaturprofils im Glas konnte nicht befriedigend gelöst werden. Vor allem ist die Bestimmung der Oberflächentemperatur wegen des steilen Temperaturgradienten in Oberflächennähe nur bei freier Abkühlung (ohne Formkontakt) mittels Pyrometer möglich.

Modellierung

Zur Modellierung des Wärmetransports bei der Glasformgebung wurde der CFD-Code FLUENT /4/, eines der weltweit führenden Programme zur numerischen Berechnung von Strömungen mit Energie- und Stofftransport ausgewählt, da es gestattet einen weiten Bereich von Transportprozessen zu modellieren, wobei es sich um laminare oder turbulente, inkompressible oder kompressible, stationäre oder instationäre Strömung mit zusätzlichem Wärme- und Stofftransport sowie chemischen Reaktionen handeln kann und das auch in der Glastechnik Anwendung findet. Zur Berechnung eines variablen Absorptionskoeffizienten liefert FLUENT ein Banden-Modell, bei dem der spektrale Absorptionskoeffizient schrittweise entlang der spektralen Banden, jedoch glatt innerhalb dieser Banden variiert. Für die Betrachtung des Strahlungswärmetransportes in semi-transparenten Medien wie Glas steht mit dem Diskreten-Ordinaten-Modell (DOM) ein spezielles Werkzeug zur Verfügung, das als Teil der Berechnung die Eingabe des Brechungsindex erfordert. Die für die Aufgabenstellung wesentlichen Aussagen werden durch ein problemangepasstes Modell realisiert. Das Modell, welches das Verhalten des tatsächlichen Systems unter Berücksichtigung von Materialeigenschaften, Randbedingungen und anderen spezifischen Parametern repräsentieren soll, wird gemäß der Versuchsanordnung zur Untersuchung des Wärmetransports bei der Formgebung heißen Glases mit Formwerkzeugen diskretisiert. Bei der Bearbeitung des Themas hat sich herausgestellt, dass die für die Berechnung erforderlichen Materialeigenschaften der Gläser, wie die Brechzahl, der Absorptionskoeffizient, die spezifische Wärmekapazität und die reine Wärmeleitfähigkeit im Temperaturbereich der Glasformgebung, nicht genau genug bekannt sind, sodass die Zielstellung nicht vorrangig in der Anpassung des Modells an die Realität bestand. Es sollte vielmehr geprüft werden, ob das Programm für die Beschreibung der Formgebung unter Berücksichtigung der Strahlung geeignet ist.

Resultate der Modellierung

Anhand der Modellierungsergebnisse wird deutlich, dass auch bei Formgebungsprozessen mit Formwerkzeugen der Anteil der Strahlung am Wärmetransport infolge des Einflusses der optischen Eigenschaften der Gläser nicht vernachlässigt werden darf. Vergleicht man die berechneten Temperaturen der Glasoberflächen, Bild 4, von Weißglas mit und ohne Strahlung (das bedeutet Weißglas mit dem Absorptionskoeffizienten Null), so wird der Unterschied deutlich. Die Wärmeabgabe an die Form vergrößert sich durch die Strahlung (Bild 5). Daraus resultiert eine höhere Oberflächentemperatur und im Inneren des Glases sinkt die Temperatur stärker ab (Bild 6).

Die Unterschiede in den Temperaturen an der Oberfläche und im Inneren zwischen Weißglas mit und ohne Strahlung zeigt auch hier den Effekt der Wärmeabstrahlung aus dem Volumen der Glasprobe. Mit steigenden spektralen Absorptionskoeffizienten wird dieser Effekt noch weiter verstärkt. Für die Wärmeübertragung unter Beteiligung der Strahlung beim Formgebungsprozess sind als weitere Parameter die Materialeigenschaften der verwendeten Formwerkzeuge von Bedeutung. Für die Modellierung sind die Eigenschaften der Formen ebenso genau zu charakterisieren wie die der Gläser. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Wärmeleitfähigkeit bzw. die Temperaturleitzahl.

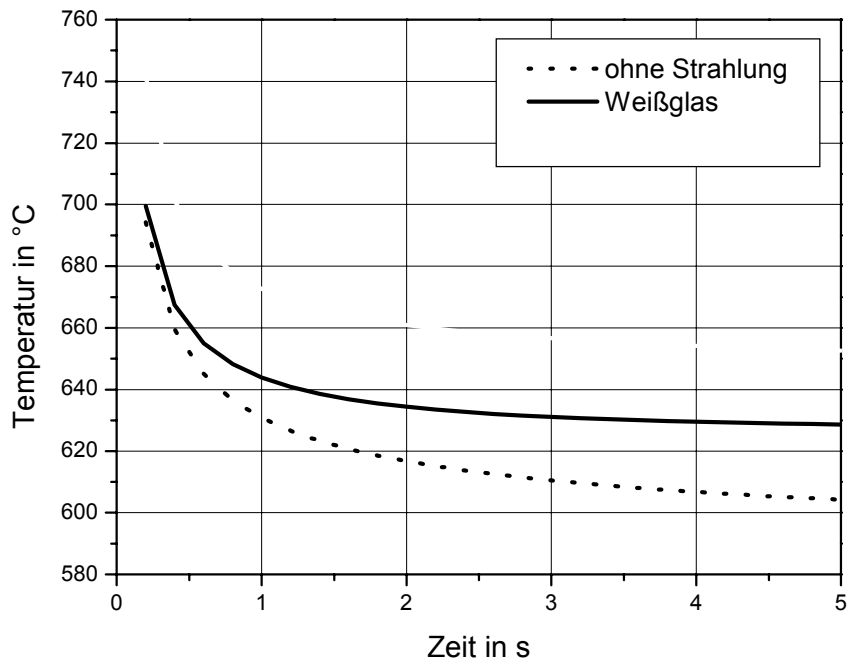


Bild 4: Temperatur der Glasoberfläche als Funktion der Zeit für Weißglas mit und ohne Strahlung.

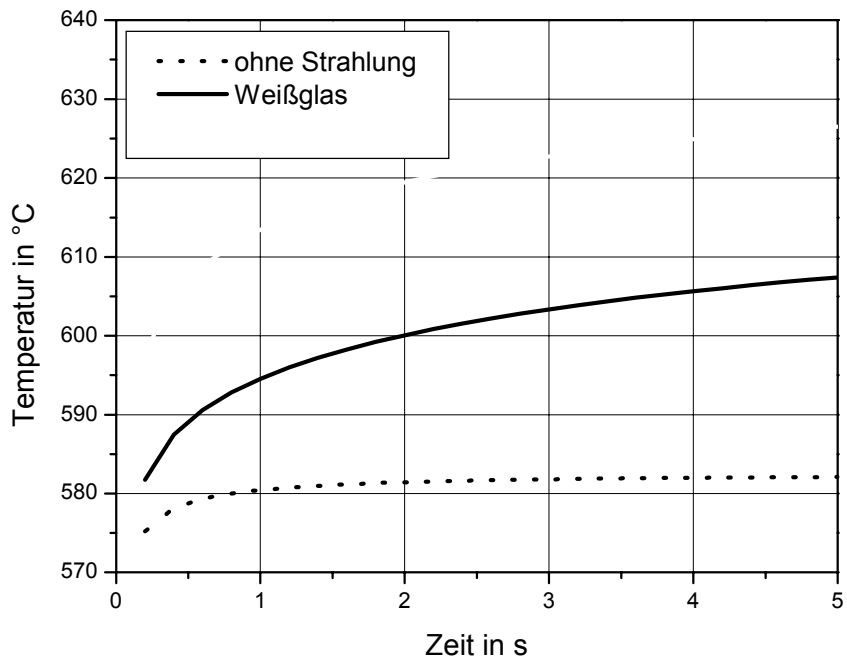


Bild 5: Temperatur der Stempeloberfläche als Funktion der Zeit für Weißglas mit und ohne Strahlung.

Der Vergleich der Berechnungen für Weißglas und für Braunglas zeigt dabei die gleichen Tendenzen. Da sich mit der Änderung der Temperaturleitzahl die Werkzeug- und Glasktemperaturen verändern, wirkt sich das auch auf den Wärmetransport durch Strahlung aus. So zeigen die in Bild 7 aufgetragenen Temperaturen der Formoberfläche, sowohl für das Weißglas als auch für das Braunglas die stärkste Erwärmung im Kontakt mit dem Stahlstempel (X10CrNiS18.9). Der Stahl besitzt von allen drei untersuchten Formwerkzeugen die geringste Wärmeleitfähigkeit. Mit steigender Wärmeleitfähigkeit und auch steigender Temperaturleitzahl ist die Erwärmung in der Reihenfolge Kugelgraphit R-40 - Lamellengraphit R-26, geringer. Da dem Glas infolge einer höheren Formtemperatur an der Oberfläche weniger Wärme entzogen werden kann, stellt sich auch bei den Glasoberflächentemperaturkurven dieselbe Reihenfolge wie bei der Stempeloberflächentemperatur ein.

Der CFD-Code FLUENT ist geeignet, die Strahlung beim Wärmetransport bei der Glasformgebung mit Werkzeugkontakt zu berücksichtigen und gestattet es die einzelnen Einflussgrößen in Wechselwirkung mit anderen zu untersuchen. Es stellt sich jedoch zunehmend die Frage nach der Qualität der Eingabedaten. Das betrifft für die Gläser neben der Absorption vor allem die Brechzahl und die reine Wärmeleitfähigkeit und für die Werkzeuge die Reflexionseigenschaften. Es wird also zunächst die Aufgabe sein für jedes zu untersuchende Glas und jeden Formenwerkstoff die notwendigen Eigenschaften möglichst exakt zu ermitteln. Unabhängig davon sind trotz der rasanten Entwicklung der Computertechnik, derartige komplexe Modellierungen selbst bei einfachen Geometrien mit erheblichem Rechenzeitaufwand verbunden. Wegen der Komplexität der Wechselwirkungen und Zusammenhänge gibt es aber zur Modellierung keine Alternative, wenn man die Einflussgrößen richtig bewerten will.

Zusammenfassung

Durch die experimentellen Untersuchungen zum Wärmetransport konnte gezeigt werden, dass die Strahlung auch bei der Formgebung mit Formwerkzeugen nicht zu vernachlässigen ist. Bei der Abkühlung im Kontakt mit einer Metallform wird bei Braunglas etwa 10 bis 15 % mehr Wärme übertragen als bei Weißglas. Dabei erhöht sich die Formoberflächentemperatur stärker als bei Weißglas. Infolge dessen erreicht das Braunglas an der Oberfläche auch eine höhere Temperatur als das Weißglas. Die gemessenen Temperaturunterschiede betragen an der Werkzeugoberfläche 5 bis 15 K zwischen Weiß- und Braunglas. Im Inneren des Glases sind die Verhältnisse umgekehrt, die Temperatur im Weißglas ist höher als im Braunglas. Entsprechend der vielfältigen Wechselwirkungen sind auch die Eigenschaften der Formwerkstoffe sowie die Rauheit der Werkzeugoberflächen von Bedeutung.

Vergleicht man die Ergebnisse, die bei den Experimenten erhalten wurden, mit denen der Berechnungen so ergeben sich in der Tendenz gute Übereinstimmungen. Daraus kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Modelle die Zusammenhänge richtig wiedergeben. Deshalb ist es sinnvoll und notwendig, die Modellierung für die Weiterentwicklung der Formgebungstechnologie zu nutzen. Defizite bestehen in der Verfügbarkeit der für die Berechnungen erforderlichen Stoffwerte.

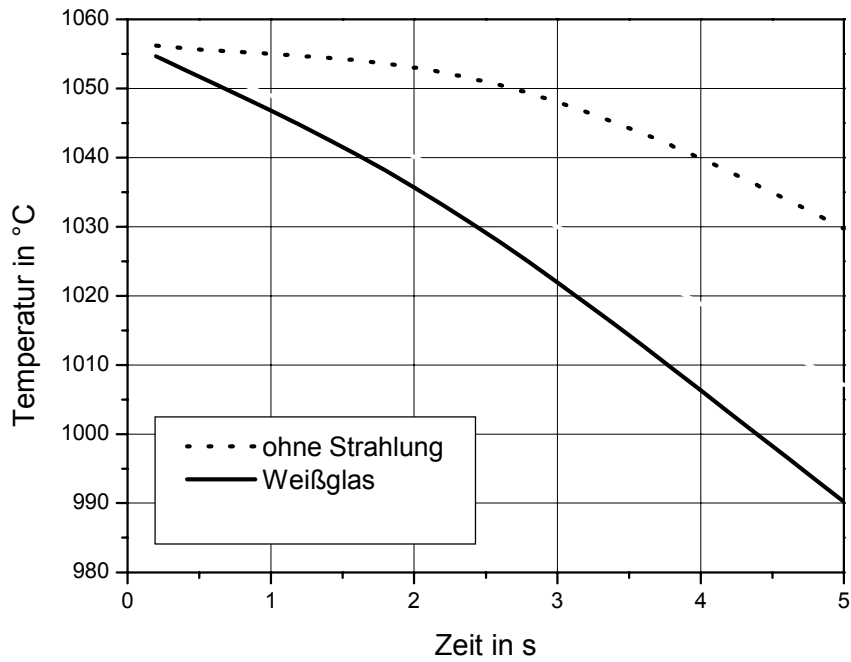


Bild 6: Temperatur in der Glasmitte als Funktion der Zeit für Weißglas mit und ohne Strahlung im Kontakt mit X10CrNi18.9.

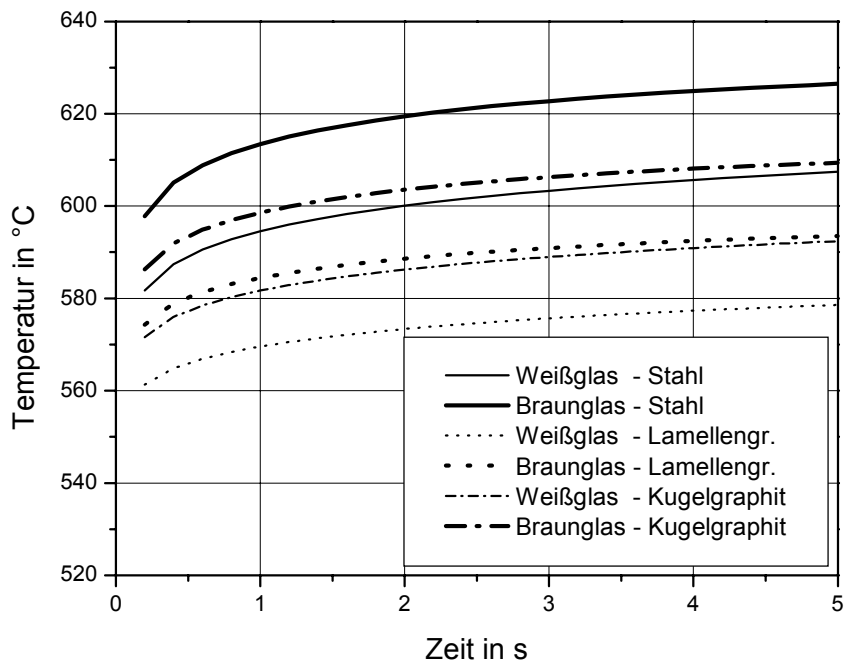


Bild 7: Stempeloberflächentemperaturen als Funktion der Zeit.

Die wirtschaftliche Nutzung der Erkenntnisse kann darin bestehen, die Maschinenleistung zur Erzielung einer optimalen Oberflächenqualität und damit Festigkeit in Abhängigkeit der optischen Eigenschaften des zu verarbeitenden Glases gezielt anzupassen, wobei es jedoch erforderlich ist, die Temperaturen der Formen genauer zu regeln.

Die Forschungsarbeiten wurden mit Unterstützung der Arbeitsgemeinschaft industriellen Forschungsvereinigungen (AiF), Köln, (AiF-Nr. 12734 BR) und der Hütten-technischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG), Frankfurt/M. durchgeführt. Finanziert wurde das Projekt mit Mitteln des Bundesministers für Wirtschaft, Berlin.

Literatur

- [1] Kluge, W. D.: Ein Beitrag zum Kontaktverhalten von Glas mit Formgebungswerkzeugen. Dissertation: Sektion Verfahrenstechnik und Silikatechnik, Bergakademie Freiberg, 1988.
- [2] Smrcek, A.: Klebetemperatur von Glas an Metall. I. Der Einfluss der festen Phase. Silikaty 11 (1967) no. 3, p. 267-277. II: Der Einfluss der Glasphase. Silikaty 11 (1967) no. 4, p. 339-344. III: Der Einfluss der Berührungsbedingungen. Silikaty 11 (1967) no. 5, p. 345-351.
- [3] Merkwitz, M., Zimmermann, H., Endrys, J.: The influence of wavelength and temperature dependent absorption coefficient on radiative heat transfer in glass forming processes. In: Advances in Fusion and Processing of Glass. Proceedings of the 6th International Conference, Glastech. Ber. Glass Sci. Technol. 73 C2(2000), Ulm (Germany) 2000. p. 241 –251.
- [4] Fluent Incorporated. FLUENT User's Guide, Version 4.4, 1996.