

HVG-Mitteilung Nr. 2119

Optimieren von Pressformen mithilfe einer schnellen numerischen
3D-Simulationsmethode

C. P. Dang, D. Brüggemann, Forschungsstelle WOPAG, Universität Bayreuth

Vortrag im Fachausschuss IV der DGG am 10. Oktober 2006 in Würzburg

1. Einleitung

Die Pressformung ist ein sehr produktives Verfahren insbesondere zur Herstellung großer und geometrisch komplizierter Glaserzeugnisse. Die steigenden Anforderungen an höhere Produktqualität und niedrigere Produktionskosten verlangen eine ständige Optimierung des Pressverfahrens. Eine besonders geeignete Methode ist die Optimierung mithilfe der Computersimulation.

Anhand des Beispiels "Pressformung von Glasplatten" wird nachfolgend die schnelle 3D-Simulationsmethode NULE vorgestellt. Die Temperaturverteilung in den Formwerkzeugen wird dabei durch Formgeometrie und Kühlsystem optimiert. Gewonnene Kenntnisse auf dem Gebiet der Pressformgebung werden vorgestellt und diskutiert.

2. Prozessparameter

In einem typischen Pressprozess wird eine bestimmte Menge heißer Glasschmelze aus dem Schmelzofen auf die kalte Metallform dosiert (Bild 1) und anschließend mit dem Pressstempel unter hohem Druck in die gewünschte Form (hier Glasplatte, Bild 2) gepresst. Das Glas wird dabei durch den Kontakt mit der Form abgekühlt und erstarrt. In der Industrie wird der Pressprozess kontinuierlich auf einem drehbaren Presstisch durchgeführt. Der technologische Ablauf der Pressformgebung auf einem runden Presstisch mit 3 Formen und 6 Stationen ist im Bild 3 skizziert.

Bei der 1. Station wird die Form mit Glasschmelze aus dem Ofen gefüllt. Danach dreht sich die Form zur 2. Station, das Glas wird dort von dem Pressstempel zum Produkt (Glasplatte) geformt. Bei der 3. Station wird die Form mit Blasluft gekühlt. Gleichzeitig werden Unebenheiten wie Nahtstellen an der Produktoberfläche durch Feuerpolitur entfernt. Bei Station Nr. 4 werden das Glasprodukt und die Form mit Blasluft gekühlt. Durch die Kühlung löst sich das Produkt von der Form ab und wird an der 5. Station aus der Form entnommen. An der letzten Station wird die Form von allen Seiten mit Blasluft auf den thermischen Ausgangszustand gekühlt, bevor die nächste Pressperiode beginnt. Eine Pressperiode dauert, abhängig von der Produktgröße, wenige Sekunden bis zu mehrere Minuten.

Der wesentliche Nachteil des Pressverfahrens ist die eingeschränkte Qualität der Glasoberfläche. Die Oberflächenqualität der gepressten Glasprodukte wird sowohl stark von der Rauigkeit der Form, als auch von der Temperatur und den Eigenschaften des Formmaterials bestimmt. Eine zu kalte Form führt zu einer ungleichmäßigen Erstarrung an der Glasoberfläche. Es entstehen orangenhautartige, gehämmerte oder wellenartige Glasoberflächen [1]. Bei zu hoher Formwerkzeugtemperatur kann das Glas auf der Form festkleben. Die wichtigen Bedingungen sind demnach eine glatte Formoberfläche und eine optimale Formtemperatur. Die Formtemperatur muss durch die Formgestaltung und das Kühlsystem in der Form in einem optimalen Bereich gehalten werden, der oberhalb des Fließwellenbildungsbereichs und unterhalb des Klebetemperaturbereichs liegt.

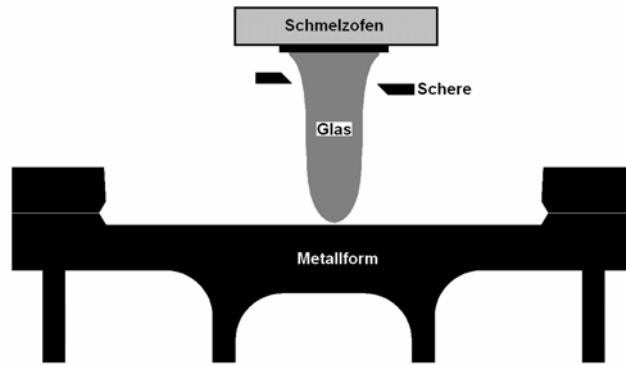


Bild 1: Dosierung der Glasschmelze auf die Metallform.

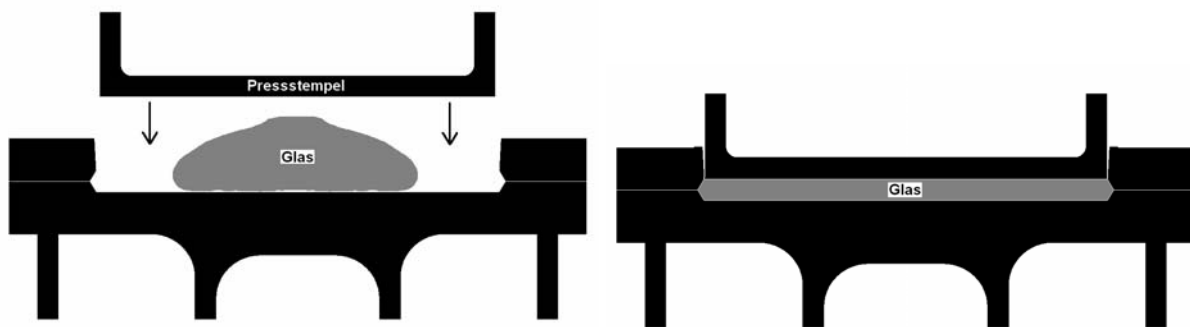


Bild 2: Pressvorgang zur Herstellung einer Glasplatte.

Weitere Einflüsse auf die Oberflächenqualität der Erzeugnisse üben die Glasviskosität (oder Glastemperatur), die Temperaturverteilung im Glastropfen und die Pressgeschwindigkeit aus. Ist die Glasschmelze zu kalt, entstehen beim Pressvorgang oft hohe Spannungen, die Risse oder Kratzer im Glas verursachen. Beim Schneiden des Glastropfens kühlen die Scheren das Glas an den Kontaktstellen so stark ab, dass sichtbare Unebenheiten (Scherenmarke) auf der Glasoberfläche entstehen können. Neben der Glasviskosität bestimmt der Pressdruck die Verformungsgeschwindigkeit. Läuft der Prozess zu langsam, können Fließwellen entstehen.

Im Bild 4 sind typische Fehler gepresster Glasprodukte in Abhängigkeit von den Parametern Glasviskosität und Formtemperatur dargestellt [2]. Der grüne Bereich markiert den typischen Arbeitsbereich der Glasproduktion, in dem ein Glasprodukt mit der besten Oberflächenqualität hergestellt werden kann. T_u und T_o sind die untere und die obere Temperaturgrenzen, in denen die Temperatur der Formoberfläche liegen soll. Die Differenz ($T_o - T_u$) beträgt dabei ~ 30 K. In der Praxis genügt es, wenn die Temperatur an bestimmten Stellen der Formoberfläche höher als die erforderliche Temperaturgrenze T_u ist. Diese Stellen befinden sich im Randbereich des Tropfens, nachdem er auf die Form gefallen ist.

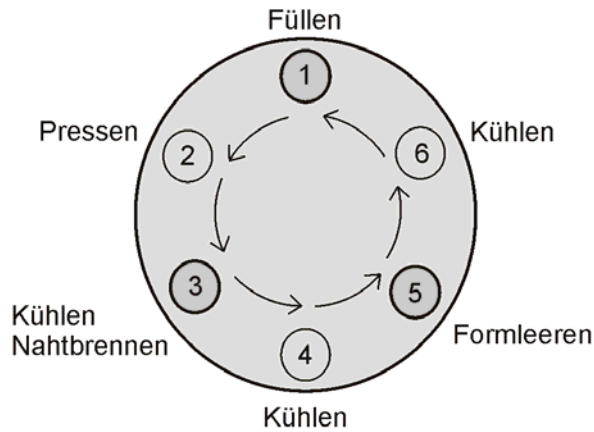


Bild 3: Ablauf der Pressformgebung auf einem drehbaren Presstisch mit 6 Stationen.

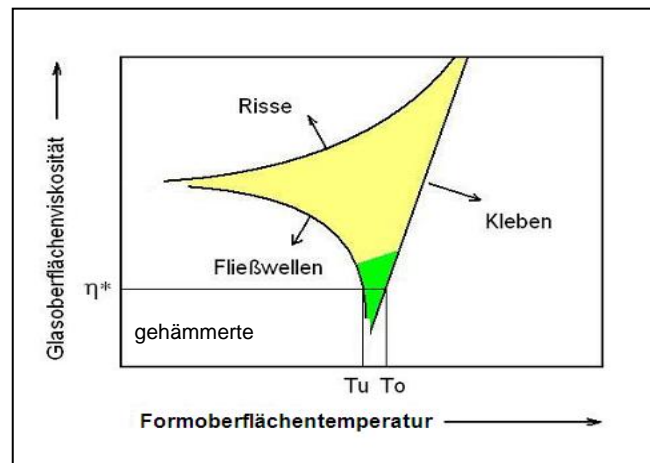


Bild 4: Typische Fehler gepresster Glasprodukte in Abhängigkeit von der Glasviskosität und Temperatur der Formwerkzeuge [2].

3. Gestaltung der Form mithilfe der Computersimulation

3.1. Energiebilanz an der Form

Beim Kontakt mit der heißen Glasschmelze erwärmt sich die Form. Die zugeführte Wärme Q_{zu} lässt sich wie folgt berechnen:

$$Q_{zu} = \alpha \cdot A_{Kontakt} \cdot (T_{Glas} - T_{Form}) \cdot t_{Kontakt} \quad (1)$$

Dabei sind α der Wärmeübergangskoeffizient, $A_{Kontakt}$ die Kontaktfläche, T_{Glas} und T_{Form} die Oberflächentemperaturen an der entsprechenden Glas- oder Formseite und $t_{Kontakt}$ die Kontaktzeit. Die Form kühlt sich dabei durch die freie Konvektion, die erzwungene Konvektion, die Wärmeleitung zum Tisch und Ring sowie durch die Wärmestrahlung an die Umgebung ab. Die entsprechenden Gleichungen für die abgeführten Wärmeströme sind:

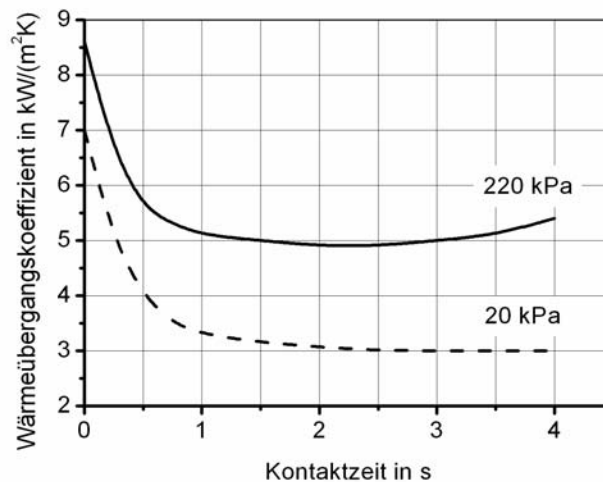


Bild 5: Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten von der Kontaktzeit und vom Pressdruck [5].

$$Q_{\text{freie}} = \alpha_{\text{freie}} \cdot A_{\text{freie}} \cdot (T_{\text{Form}} - T_{\text{Luft}}) \cdot t \quad (2)$$

$$Q_{\text{erz.}} = \alpha_{\text{erz.}} \cdot A_{\text{erz.}} \cdot (T_{\text{Form}} - T_{\text{Luft}}) \cdot t_{\text{erz.}} \quad (3)$$

$$Q_{\text{Tisch}} = \alpha_{\text{Tisch}} \cdot A_{\text{Tisch}} \cdot (T_{\text{Form}} - T_{\text{Tisch}}) \cdot t \quad (4)$$

$$Q_{\text{Strahl}} = F \cdot A_{\text{Strahl}} \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{\text{Form}}^4 - T_{\text{Rückstrahler}}^4) \cdot t \quad (5)$$

Dabei bedeuten F Formfaktor, σ Stefan-Boltzmann-Konstante und ε Emissionsgrad der Form [3]. Im Gleichgewichtszustand sind die Größen in Gleichungen (2) bis (5) relativ konstant. Die Summe der abgeführten Wärmeströme ist gleich der vom Glas zugeführten Wärme. Ist die zugeführte Wärmemenge bekannt, kann man die freie Oberfläche der Form A_{freie} und somit die Größe der Form abschätzen. Die in Gleichung (1) angegebenen Parameter sind dagegen keine konstanten Größen. Der Wärmeübergangskoeffizient hängt beispielweise von der Formtemperatur, vom Pressdruck und der Zeit ab. In ähnlicher Form ändern sich die Glas- und Formtemperatur an der Kontaktfläche (siehe Bild 5 und 6). Eine exakte Berechnung der Wärmeströme erfordert demnach großen Aufwand und lange Rechenzeit. Hierfür bietet die Computational Fluid Dynamics (CFD) eine Alternative, mit der man den Pressprozess in symmetrischen Formen und Produkten simulieren kann [4].

3.2. Simulationenmethoden und Ergebnisse

Die Bilder 7a – 7c zeigen die Ergebnisse einer CFD-Simulation. Das Modell ist achsen-symmetrisch. Für den Wärmetransport, die Verformung und Erstarrung des Glases werden Bilanzgleichungen für die Masse, die Energie, den Impuls sowie die Gleichung zur Beschreibung der Glasoberfläche und deren Deformation gelöst. Weitere Gleichungen sind für die Berechnung der Bewegung des Pressstempels und des Wärmeübergangs an der Kontaktfläche Glas/Form.

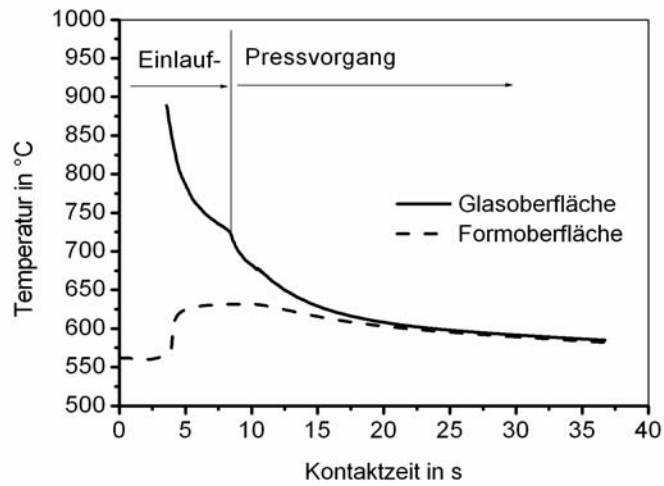


Bild 6: Temperaturverlauf an der Glas- und Formoberfläche während eines Pressvorgangs.

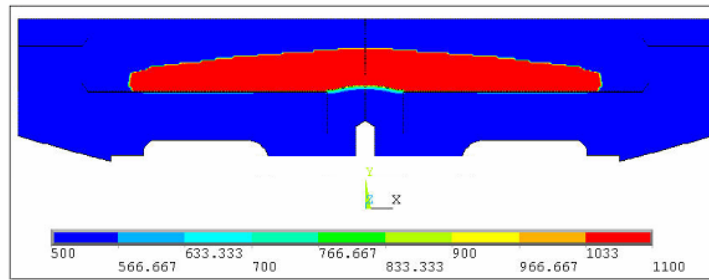


Bild 7a: Speisevorgang.

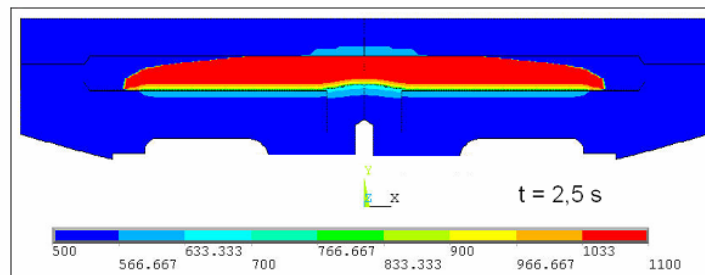


Bild 7b: Temperaturverteilung kurz vor Pressbeginn.

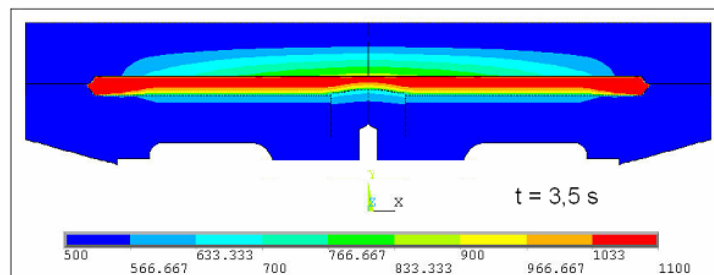


Bild 7c: Temperaturverteilung kurz nach Pressende.

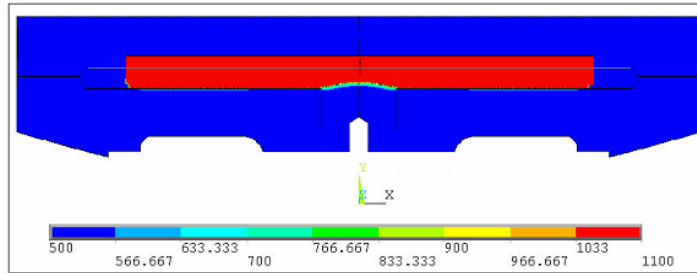


Bild 8a: Speisevorgang.

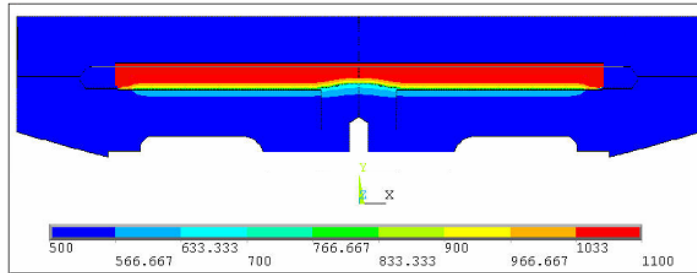


Bild 8b: Temperaturverteilung kurz vor Pressbeginn.

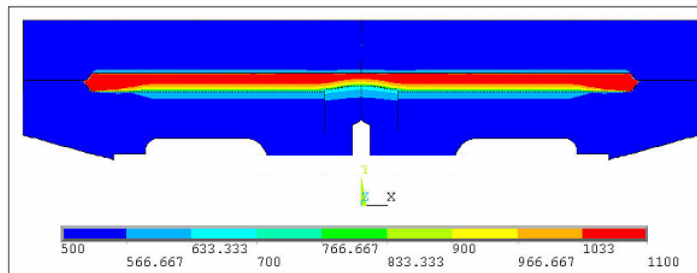


Bild 8c: Temperaturverteilung kurz nach Pressende.

Wenn man die Simulationsergebnisse genauer betrachtet, so stellt man fest, dass die Verformung folgende Charakteristika aufweist:

- Unabhängig von der Produktgeometrie und der Anfangsform der Glasschmelze erhält das Glas am Ende der Formgebung immer die gewünschte Form.
- Durch die hohe Pressgeschwindigkeit beeinflusst der Pressstempel die Glastemperatur nur an der Kontaktfläche.

Aus diesen Gründen kann der Fließprozess des Glases bei der Pressformgebung vereinfacht simuliert werden, ohne den Wärmetransport zwischen der Form und dem Glas wesentlich zu beeinflussen. Die Bilder 8a bis 8c zeigen das Prinzip der Methode „Neu-Definieren und Löschen von Elementen“ (NULE). Das Herabfallen des Glases auf die Form und das Ausbreiten des Glases auf der Formoberfläche werden durch einfache Definition oder Löschen der Glaselemente simuliert. Die Anfangstemperatur der neu-definierten Elemente kann abhängig von der Prozessdauer entsprechend den Messdaten festgelegt werden.

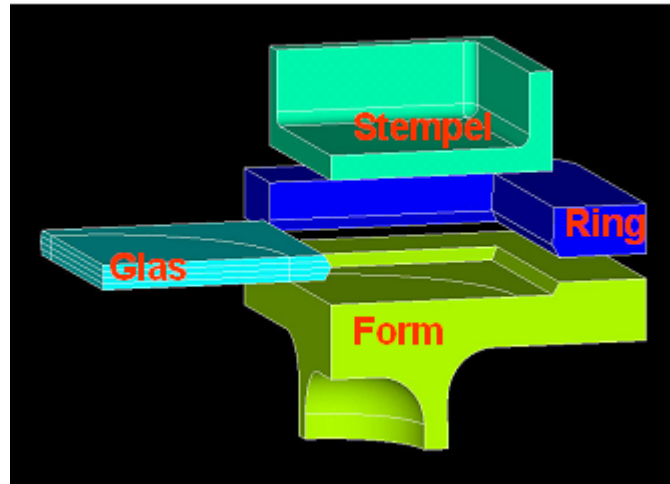


Bild 9: 3D-Modell für das Pressen quadratischer Glasplatten.

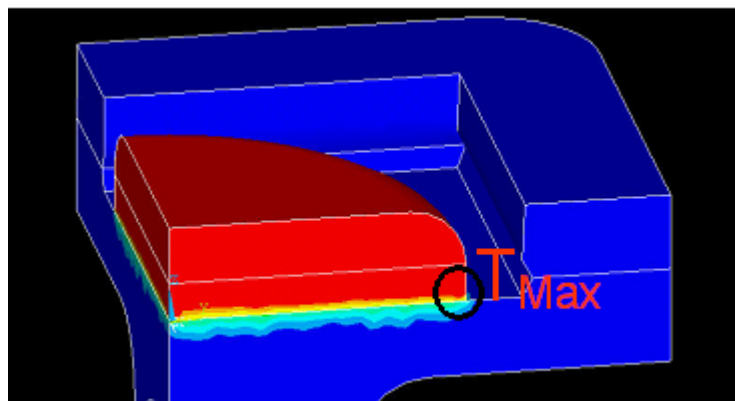


Bild 10: Ziel der Formgestaltung: Maximale Temperatur am Tropfenrand.

Bei der NULE-Methode werden nur noch die Gleichungen zur Formulierung der Verformung, der Stempelbewegung und die Energiebilanz gelöst. Die Rechenzeit wird dadurch erheblich reduziert. Die Methode kann für beliebige 3D-Modelle angewendet werden. Bild 9 zeigt ein 3D-Formmodell zur Herstellung quadratischer Glasplatten. Aus Symmetriegründen wird nur ein Viertel des gesamten Modells betrachtet. Randbedingungen sind die Anfangstemperaturen von der Glasschmelze und den Formwerkzeugen. Die Form wird zusätzlich in der Mitte durch Kühlluft gekühlt. Ziel der Optimierung ist die maximale Formtemperatur am Tropfenrand vor dem Pressvorgang in einem von der Glaszusammensetzung abhängigen Bereich zu regeln, hier von 600 °C bis 630 °C (Bild 10). Dies kann durch die Formgeometrie oder durch das Kühlsystem erreicht werden. Bild 11 zeigt, wie die Temperaturverteilung von der Formstärke abhängt. Ist die Form gleichmäßig stark (Bild 11, oben), so befindet sich die heißeste Stelle in der Formmitte. Wird die Form in der Mitte massiver gebaut, verschiebt sich die heißeste Stelle zum Formrand hin (Bild 11, unten). Bei der Kühlung der Form muss darauf geachtet werden, dass massive Formen nicht sofort auf die Kühlung reagieren. Bild 12 zeigt die Reaktionszeit der Form in Abhängigkeit von der Formstärke und der Wärmeleitfähigkeit des Materials. Kühlt man beispielweise eine 30 mm dicke Form von unten ab, so reagiert die obere Formoberfläche aus Gusseisen erst nach ca. 7 s auf die Kühlung. Bei einer Form aus Nickel-Chrom-Legierung beträgt die Reaktionszeit sogar ca. 15 s.

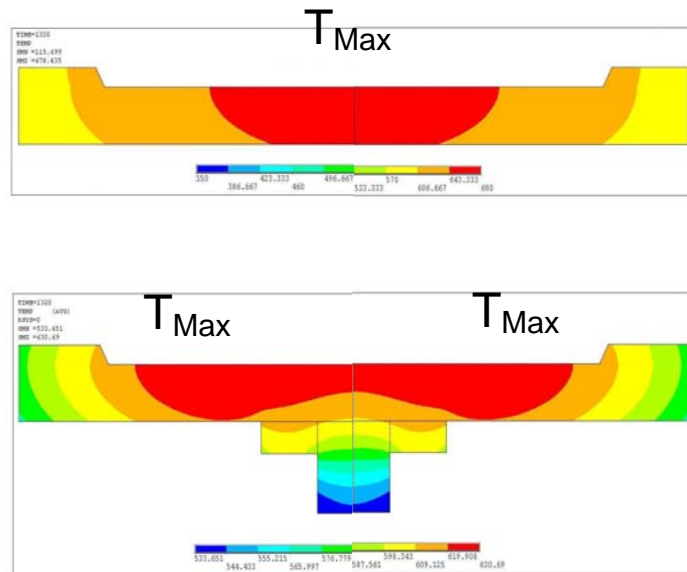


Bild 11: Temperaturverteilung in Abhängigkeit von der Formdicke.

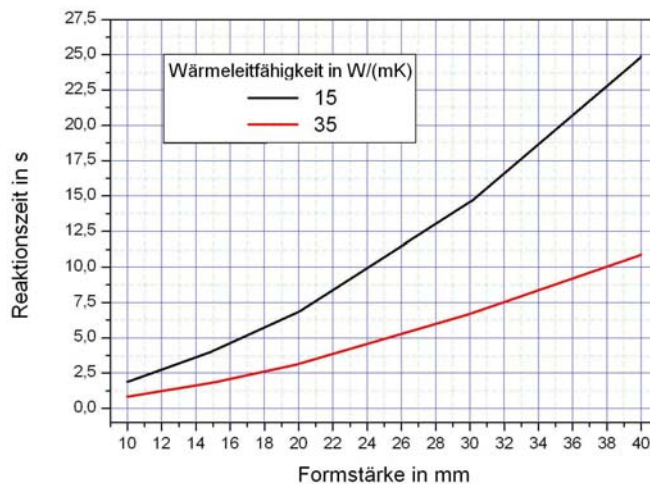


Bild 12: Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Formstärke und von der Wärmeleitfähigkeit des Formmaterials.

In Bild 13 werden die Temperaturentwicklung in einer optimierten Form während eines Pressprozesses dargestellt. Bild 14 zeigt die Temperaturentwicklungen an drei Stellen auf der Formoberfläche in den ersten 11 Pressperioden. Wird die Form zu Beginn auf 300 °C erwärmt, bildet sich ein thermischer Gleichgewichtszustand nach ca. 18 Pressperioden aus. Anhand der Ergebnisse kann man die Formgeometrie und die Kühlung an verschiedenen Stellen schrittweise verändern, bis die optimale Temperaturverteilung in der Form erreicht ist.

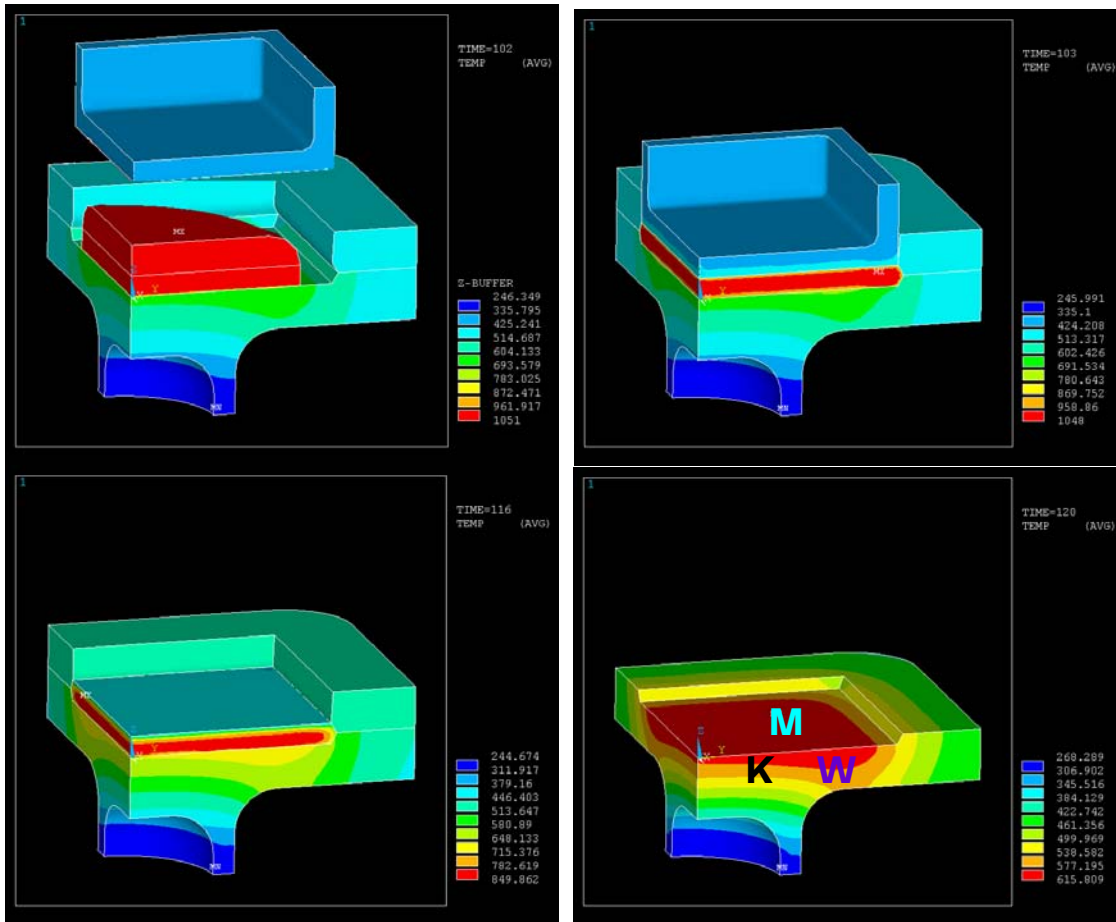


Bild 13: Temperaturentwicklung in der Form während eines Pressprozesses.

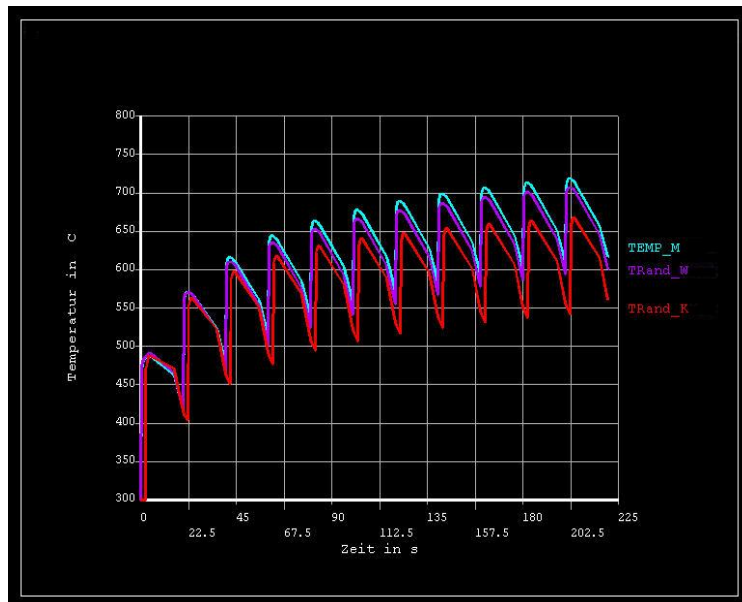


Bild 14: Temperaturentwicklung an 3 Stellen (M, K und W) auf der Formoberfläche im Laufe der ersten 11 Pressperioden.

3. Fazit

Durch seine Besonderheiten kann das Pressverfahren mithilfe der NULE-Methode simuliert werden. Sie erlaubt thermische 3D-Simulationen beliebiger Pressprozesse. Die Formgeometrie und das Kühlsystem der Formwerkzeuge können dadurch optimiert werden. Die Computersimulation ist schnell, risikolos und verursacht demnach keine hohen Kosten.

4. Literatur

- [1] H. Jebesen-Marwedel, R. Brückner: „Glastechnische Fabrikationsfehler“, Springer Verlag, Berlin 1980.
- [2] R. Schumacher: „Wärmetransport bei der Formgebung“, HVG Fortbildungskurs 2002.
- [3] F. M. Modest: “Radiative heat transfer”, MacGraw-Hill, New York u.a. 1993.
- [4] ANSYS 8.0, Inc. Theory Reference.
- [5] C.J. Fellows, F. Shaw: “A laboratory investigation of glass to mould heat transfer during pressing”, Glass Technology 19 (1978) Nr. 1, S. 4-9.