

Modellrechnungen zur Temperaturverteilung in Glastropfen“

K. Kessler, H. Müller-Simon, G. Bergmann, HVG, Offenbach

1. Einleitung

In einem Glastropfen ändert sich die Temperaturverteilung zwischen Speiser und Vorform unkontrolliert durch Abstrahlung, Konvektion und den Kontakt mit kalten Maschinenteilen. Die dadurch induzierten Ungleichmäßigkeiten der Temperaturverteilung im Tropfen führen zu einer inhomogenen Verteilung des Glases im Produkt. Da die Bereiche mit der geringsten Wanddicke die Festigkeit eines Behälters bestimmen, ließen sich durch das Erzielen einer gleichmäßigen Wandstärke Energie und Rohstoffe einsparen. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens soll die Temperaturverteilung in den Glastropfen und ihre Änderung zwischen der Tropfenentstehung am Speiser und der Vorform erfasst und Mittel zu ihrer gezielten Beeinflussung erarbeitet werden. Als Grundlage dienen optische Temperaturmessungen, welche mit einer computergestützten Modellierung der Abkühlung des Tropfens nachvollzogen werden sollen.

2. Theoretische Grundlagen

Das Temperaturfeld eines Körpers kann durch Lösung der Wärmetransportgleichung berechnet werden. In der einfachsten Näherung der Gleichung kann der Strahlungsanteil durch eine effektive Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt werden. Es zeigt sich, dass diese Näherung für Braunglas zufriedenstellende Ergebnisse liefert:

$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k_{eff} \cdot \nabla^2 T \quad (1)$$

Die Wärmetransportgleichung enthält neben der Temperatur T und der Zeit t die Stoffdaten Wärmeleitfähigkeit $k_{eff}(T)$, die spezifische Wärmekapazität $c_p(T)$ und die Dichte $\rho(T)$. Für die Berechnung des Temperaturfeldes werden weiter die Randbedingungen für die Wärmeabgabe benötigt, welche entweder durch Strahlung erfolgt:

$$q = \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (2)$$

mit q : Wärmestromdichte, ε : Emissionsgrad, σ : Stefan-Boltzmann-Konstante, T : Temperatur und T_0 : Umgebungstemperatur oder durch Kontakt:

$$q = \alpha (T - T_0) \quad (3)$$

mit q : Wärmestromdichte, α : Wärmeübergangskoeffizient, T : Temperatur und T_0 : Umgebungstemperatur. Für die Modellrechnungen werden entsprechend der Gleichungen 2 und 3 der Emissionsgrad $\varepsilon(T)$ und Wärmeübergangskoeffizienten α für den Kontakt mit den Mittelrinnen bzw. Deflektoren benötigt. Bei der Strahlung ist die Umgebungstemperatur vernachlässigbar.

3. Daten

Als Referenzdaten stehen optische Temperaturmessungen an einer IS-Maschine für die Produktion von braunem Behälterglas zur Verfügung, welche mit 3 Pyrometern verschiedener Wellenlängen (1,46 μm , 3,9 μm und 5,14 μm) nach der Schere und am Ende des Deflektors durchgeführt wurden (vgl. Tabelle 1 und Tabelle 2). Die Sichttiefen, welche den unterschiedlichen Wellenlängen zugeordnet werden können, wurden für verschiedene

Temperaturverteilung in Glastropfen

Wellenlänge	5,14 μm	3,9 μm	1,46 μm
Minimum - Maximum	1120,5°C - 1152,9°C	1156,5°C - 1194,7°C	1181,6°C - 1202,6°C
Mittelwert	1131,5°C	1169,3°C	1191,2°C

Tabelle 1: Mit 3 Pyrometern unterschiedlicher Wellenlänge gemessene Temperaturen nach der Schere

Stationen	1/12	2/11	3/10	4/9	5/8	6/7
1,46 μm	1171,5°C	1176,6°C	1178,1°C	1178,4°C	1182,1°C	1187,9°C
3,90 μm	1132,7°C	1134,7°C	1140,8°C	1138,7°C	1147,6°C	1155,6°C
5,14 μm	1043,6°C	1039,1°C	1063,3°C	1071,8°C	1077,3°C	1108,2°C

Tabelle 2: Mittelwerte der gemessenen Temperaturen am Ende des Deflektors für die 6 Stationspaare

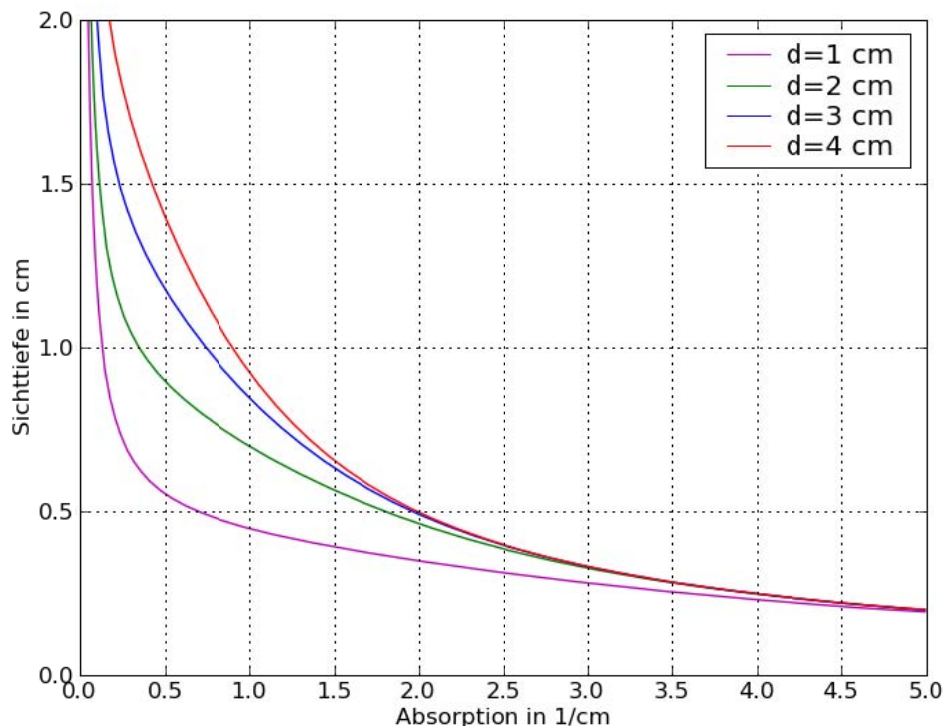


Bild 1: Berechnete Sichttiefen für verschiedene Tropfendurchmesser in Abhängigkeit von der Absorption

Tropfendurchmesser nach einer verbesserten Form der Eddington-Barbier Beziehung [1] berechnet (vgl. Bild 1). Desweiteren wurden die Temperaturen der Mittelrinnen in unterschiedlichen Abschnitten gemessen. Tropfenlängen und Tropfengeschwindigkeiten wurden mit einem Speedgob bestimmt, das Tropfengewicht dem Produktionsplan entnommen. Die Kontaktzeiten an Mittelrinnen und Deflektoren für die einzelnen Stationen wurde aus den Bewegungsgleichungen berechnet (Tabelle 3) Die benötigten Stoffdaten effektive Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität [2] und Dichte [3, 4, 5] wurden in der Literatur recherchiert. Da Spektren im erforderlichen Bereich zwischen 0,3 und 5 μm insbesondere bei Schmelztemperatur nicht zu Verfügung standen, wurden für die Modellierung Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit von zwei verschiedenen Gläsern herangezogen [6, 7], welche in Tabelle 4 aufgeführt sind. Für die spezifische Wärmekapazität wurden Werte von 800 J/(kg·K) bis zu 200 °C bzw. 1400 J/(kg·K) ab 600 °C verwendet. Dazwischen steigt der Wert linear an. Für die Dichte wurde ein konstanter Wert von 2,35 g/cm³ eingesetzt. Für den Emissionsgrad liefert ein Wert von 0,96 sinnvolle Ergebnisse. Der Wärmeübergangskoeffizient ist unbekannt und muss auf der Basis der gegebenen Randbedingungen angenähert werden.

Stationen	1/12	2/11	3/10	4/9	5/8	6/7
Mittelrinnen	535 ms	464 ms	399 ms	331 ms	284 ms	252 ms
Deflektoren	65 ms	94 ms	126 ms	156 ms	180 ms	195 ms

Tabelle 3: Aus den Bewegungsgleichungen berechnete Kontaktzeiten für die Mittelrinnen (inkl. Scoop =45 ms) und Deflektoren der 12 Stationen

Temperatur in °C	20	600	800	1.000	1.200	1.300	1.400
für Glas 1 in W/(m·K)	1.0	2.0	8.0		22.0	30.0	
für Glas 2 in W/(m·K)	1.0	1.04	2.91	6.25	11.07		20.60

Tabelle 4: Werte der zur Modellierung herangezogenen effektiven Wärmeleitfähigkeit für zwei Gläserspektren nach Endrys und Blazek

Grob verallgemeinert lässt sich das Problem der Berechnung der Temperaturverteilung, in Abhängigkeit vom Radius und der Zeit, als mathematische Funktion beschreiben:

$$T(\vec{r}, t) = f(T_S, \varepsilon_S, \alpha_S, t_S, T_R, \varepsilon_R, \alpha_R, t_R, T_D, \varepsilon_D, \alpha_D, t_D) \quad (4)$$

mit T: Temperatur, t: Zeit, ε : Emissionsgrad, α : Wärmeübergangskoeffizient und Indizes S: Speiser, R: Rinne und D: Deflektor. Basierend auf den oben aufgeführten Daten wird zunächst ein Modell erstellt, welches nur die Längenunterschiede der Mittelrinnen und Deflektoren der einzelnen Stationen betrachtet. Dabei werden schrittweise die verschiedenen Faktoren wie Emissionsgrad, Rinnen-, Speiser- und Deflektortemperaturen bestimmt, sowie die stationsspezifischen Kontaktzeiten berechnet. Der Wärmeübergangskoeffizient kann erst ermittelt werden, wenn alle anderen Faktoren abgeklärt sind.

4. Beschreibung der Modellierung

Für Berechnungen der Temperaturverteilung wurde die freie FEM-Software CalculiX [8] Version 1.8 verwendet. Anfangs wurden alle Berechnungen mit dem Solver Spooles durchgeführt. Um einen Vergleich zu den Ergebnissen anderer Solver zu erhalten, wurden Berechnungen später auch mit dem Iterative Cholesky und dem Iterative Scaling Solver durchgeführt, welche identische Ergebnisse lieferten. Die Laufzeit der beiden Solver war im Vergleich zu Spooles wesentlich kürzer (Iterative Scaling neunmal schneller und Iterative Cholesky dreimal schneller). Um die Genauigkeit der Berechnungen zu verbessern, wurde die Tropfenstruktur mehrmals verfeinert und die Anzahl der Knoten erhöht. Es zeigte sich, dass Spooles an einem bestimmten Punkt der hohen Anzahl an Knoten nicht mehr gewachsen war, weshalb am Ende nur noch der Iterative Cholesky Solver verwendet wurde.

In der folgenden Berechnung wird der gesamte Weg eines Tropfens vom Speiser über die Schere, über die Mittelrinne bis hin zum Deflektor modelliert. Die Modellierung lässt sich in drei Abschnitte unterteilen:

1. Abschnitt: Zunächst wird die Zeit der Tropfenentstehung aus dem Speiser über die Schere bis zum Ende des freien Falls modelliert. Der Tropfen ist hierfür in 10 Ebenen unterteilt, die nacheinander im Abstand von 0,05 s aus dem Speiser auslaufen, mit der Umgebung in Kontakt treten und mit einem Emissionsgrad von 0,96 Wärme abstrahlen. Der zylinderförmige Tropfen hat ein Gewicht von 385 g und eine Höhe von 17 cm, wodurch sich bei einer Dichte von 2,35 g/cm³ ein Radius von 1,75 cm ergibt. Nach 0,65 s wird der Tropfen an der Schere geschnitten und fällt senkrecht nach unten. Die Temperaturmessung findet etwa 30 cm unter der Schere statt und ist im oberen Bereich des Tropfens angesetzt, also dem Abschnitt, der am kürzesten mit der Umgebung in Kontakt war. Der Zeitpunkt der Messungen liegt bei 0,95 s. In diesem Abschnitt der Modellierung entstehen thermische Veränderungen innerhalb des Tropfens aufgrund von Kontakt mit der Speiserwand bzw. dem Tropfring und Strahlung.

2. Abschnitt: Das nach 0,95 s berechnete Temperaturprofil des Tropfens wird nun auf die Knoten eines längeren Zylinders mit gleichem Volumen übertragen. Durch diesen Schritt soll die Verlängerung des Tropfens im Scoop simuliert werden, welche aus den Messdaten hervorgeht. Die Höhe dieses Tropfens beträgt 22,0 cm, der Radius 1,54 cm. Dieser strahlt ebenso mit einem Emissionsgrad von 0,96 weiter. Hinzu kommt jedoch der Wärmeverlust aufgrund des Kontakts mit der Rinne. Die Rinnentemperatur ist bei 100°C angesetzt und entspricht der mittleren, gemessenen Rinnentemperatur.

3. Abschnitt: Der letzte Abschnitt der Modellierung beinhaltet den Kontakt mit dem Deflektor. Wie schon im 2. Abschnitt werden die Temperaturen des 2. Tropfens auf ein weiteres Tropfenmodell übertragen, welches eine Höhe von 28,0 cm und einen Radius von 1,36 cm hat. Dadurch wird die aus den Messungen hervorgehende Längung des Tropfens im Deflektor simuliert. Neben Strahlung und dem Wärmeverlust aufgrund des Kontakts mit dem Deflektor, trägt in diesem Abschnitt auch die Rückerwärmung im Tropfen zur thermischen Veränderung bei, welche auf der Seite des Tropfens stattfindet, die mit der Mittelrinne in Kontakt war. Konvektion wurde bei der Modellierung nicht berücksichtigt.

4.1 Tropfenbildung (1. Abschnitt)

In diesem Abschnitt wird die Entstehung des anfänglichen Temperaturprofils modelliert. Aufgrund von Unsicherheiten im Bezug auf das Spektrum des Glases und dem genauen Ablauf und Einfluss verschiedener Faktoren bei der Entstehung des anfänglichen Temperaturprofils, werden unterschiedliche Berechnungen durchgeführt, mit dem Ziel, sich den Temperaturen der Messdaten nach der Schere anzunähern.

a) Berechnung mit einheitlicher Knotentemperatur

In einem ersten Berechnungslauf wird zu Beginn allen Knoten des Zylinders eine Temperatur von 1192 °C zugewiesen. Diese entspricht dem Mittelwert der Messdaten bei einer Wellenlänge von 1,46 µm nach der Schere. Durch diese Berechnung soll zunächst ein Eindruck davon gewonnen werden, wie sich die unterschiedlichen effektiven Wärmeleitfähigkeiten auf das Temperaturprofil des Glastropfens auswirken. Thermische Veränderungen entstehen im Tropfen also nur aufgrund von Strahlung. In Bild 3a und Bild 4a sind die Ergebnisse für beide Gläser dargestellt. Für alle 3 Wellenlängen sind sowohl die minimale als auch die maximale Temperatur eingetragen. Die roten Punkte stellen die Mittelwerte da. Die Sichttiefen nach Eddington-Barbier für Glas 1 liegen für eine Wellenlänge von 1,46 µm bei 1,15 cm und für 3,9 µm bei 0,37 cm. Bei Glas 2 liegen die Sichttiefen für 1,46 µm bei 0,5 cm und für 3,9 µm bei 0,23 cm. Für eine Wellenlänge von 5,14 µm ist die Sichttiefe bei etwa 0,01 cm angesetzt, liegt also dicht an der Oberfläche des Glastropfens. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass das aus den Messdaten hervorgehende, anfängliche Temperaturprofil nach der Schere, in einem Zeitraum von 0,95 s nicht alleine durch Strahlung entstehen kann.

b) Berechnung mit vorgegebenem Temperaturprofil

Ausgehend von den in a) gewonnenen Ergebnissen wird im nächsten Berechnungsschritt für beide Gläser zu Beginn ein äußerer Knotenring mit einer abgeschätzten Breite definiert und den Knoten, welche Teil dieser äußeren Hülle sind, eine niedrigere Temperatur zugewiesen (vgl. Bild 2). Ein solches Temperaturprofil kann sich aus dem Kontakt der Schmelze mit dem Speisermaterial ergeben. Durch dieses vorgegebene Temperaturprofil soll bis zum Zeitpunkt der Messung (nach 0,95 s) ein Temperaturprofil erreicht werden, welches sich den Messdaten für alle drei Wellenlängen annähert. Das beste Ergebnis für beide Gläser liefert eine äußere Temperatur von 1126 °C (vgl. Bild 3b und Bild 4b), wobei die Breite der äußeren Hülle bei Glas 1 2,5 mm betragen würde und bei Glas 2 1,0 mm.

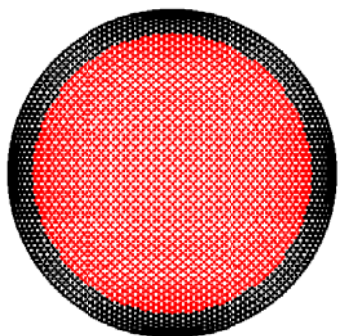


Bild 2: Vorgegebenes Temperaturprofil: die roten Knoten haben zu Beginn eine Temperatur von 1192 °C - die schwarzen Knoten eine Temperatur von 1126 °C

c) Berechnung mit Wärmeverlust durch Speiserkontakt

In einem weiteren Berechnungsdurchlauf soll geprüft werden, ob sich die Abkühlung im Randbereich des Tropfens durch den Kontakt mit der Speiserwand bzw. dem Tropftring beim Austreten des Tropfens aus dem Speiser darstellen lässt. Hierfür wird für jede der 10 Ebenen des Zylinders nacheinander alle 0,05 s zunächst der Kontakt mit dem Tropftring simuliert, welcher eine Abkühlung im Randbereich des Tropfens zur Folge hat. Der Kontakt dauert etwa 0,25 s an. Anschließend wird für jede Ebene der Wärmeverlust durch Strahlung berechnet. Die beste Annäherung an die Messdaten wird für beide Gläser mit einem Wärmeübergangskoeffizient von 20000 W/(m²·K) erzielt was einem intensiven Kontakt entspricht. Für Glas 1 würde die Speisertemperatur bei 1000 °C liegen und für Glas 2 bei 1075 °C (vgl. Bild 3c und Bild 4c). Das Temperaturprofil lässt sich gut mit dem Tropftringkontakt erklären. Für weitere Verbesserungen müsste die unterschiedliche Viskosität über den Tropfenradius in die Modellierung miteinbezogen werden.

4.2 Kontakt mit der Mittelrinne (2. Abschnitt)

Der zweite Teil der Modellierung behandelt den Wärmeverlust aufgrund des Kontakts mit der Mittelrinne. Das im ersten Abschnitt der Modellierung berechnete Temperaturprofil dient hierbei als Grundlage, wobei die Temperaturen der Knoten des ersten Tropfenmodells auf die Knoten des neuen, längeren Tropfens übertragen werden. Auch in diesem Teil der Berechnung spielen Faktoren eine Rolle, die nicht mit Sicherheit bestimmt werden können. Dazu gehören die Intensität des Kontakts zwischen Tropfen und Mittelrinne, die Größe des Wärmeübergangskoeffizienten, sowie die unterschiedlichen Kontaktzeiten für die einzelnen Stationen.

Um einen Eindruck davon zu gewinnen, wie sich unterschiedliche Wärmeübergangskoeffizienten auf das Temperaturprofil eines Glastropfens auswirken, werden zunächst, basierend auf den im ersten Abschnitt berechneten Temperaturen, Berechnungen mit verschiedenen Wärmeübergangskoeffizienten bei gegebener Kontaktzeit durchgeführt.

Bild 5 zeigt das Temperaturprofil des Tropfens am Ende der Mittelrinne für die Wärmeübergangskoeffizienten 1000, 2000, 3000 und 10000 W/(m²·K). Der einzige Unterschied zwischen den Berechnungen ist die Temperatur, welche in einem Zeitfenster von 0,535 s im Randbereich des Tropfens erreicht wird. Bei einem Wärmeübergangskoeffizient von 10000 W/(m²·K) sinkt die Temperatur in der äußeren Schicht des Tropfens bis auf etwa 400 °C ab. Wie deutlich zu erkennen ist, hat der Wärmeübergangskoeffizient ab einer Tiefe von 0,75 cm keinen Einfluss mehr auf das Temperaturprofil. Die in der Literatur von Blazek angegebene Absorption (Glas 1) ergibt für eine Wellenlänge von 1,46 µm eine

Temperaturverteilung in Glastropfen

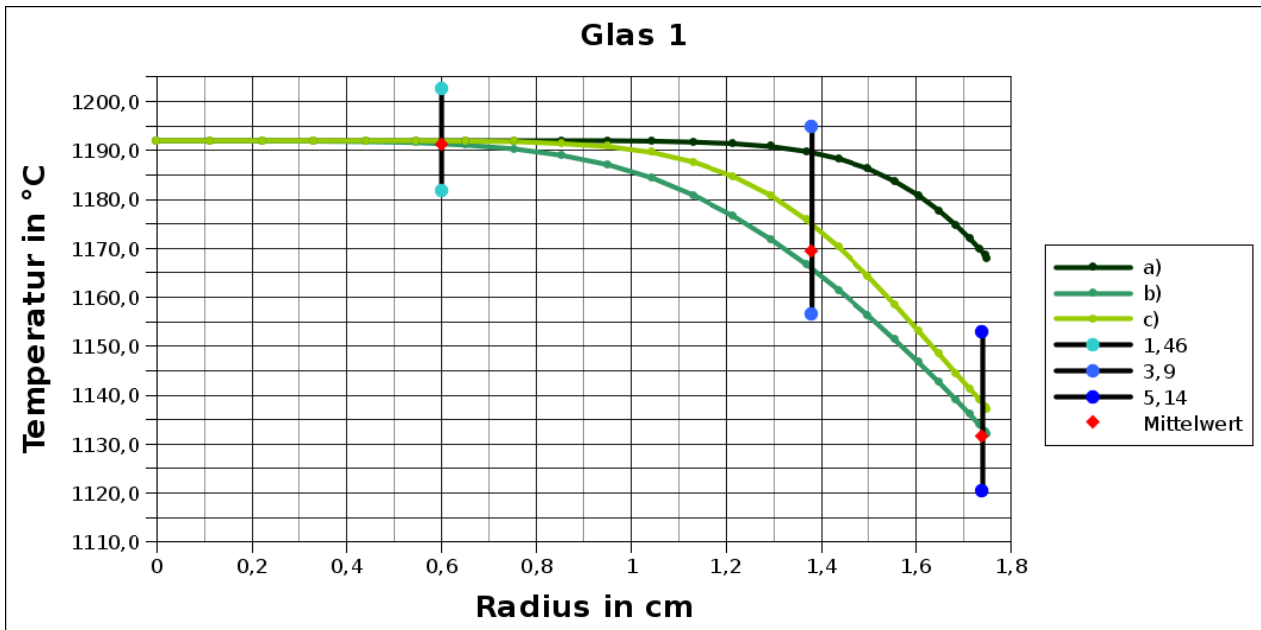


Bild 3: Vergleich der unterschiedlich berechneten Temperaturprofile von Glas 1 nach der Schere:

- a) nur über die effektive Wärmeleitfähigkeit
- b) mit vorgegebenem Temperaturprofil in der Speiserschüssel
- c) mit Abkühlung durch Speiserkontakt und Strahlung

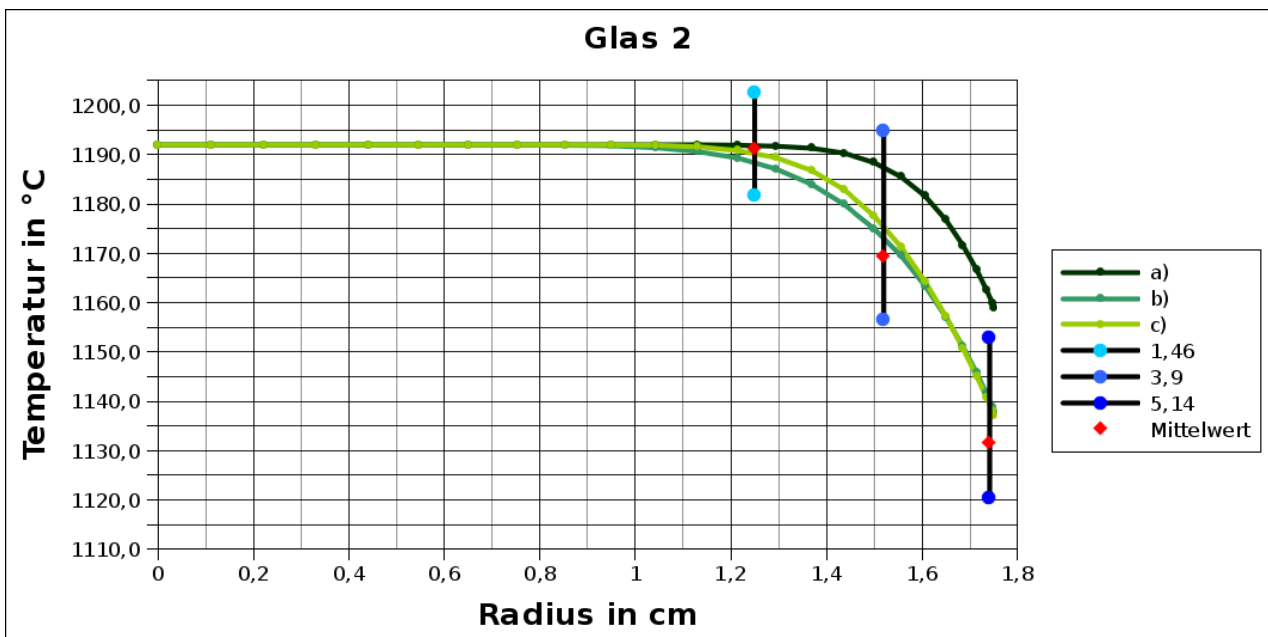


Bild 4: Vergleich der unterschiedlich berechneten Temperaturprofile von Glas 2 nach der Schere:

- a) nur über die effektive Wärmeleitfähigkeit
- b) mit vorgegebenem Temperaturprofil in der Speiserschüssel
- c) mit Abkühlung durch Speiserkontakt und Strahlung

Sichttiefe von 1,15 cm. In dieser Tiefe lässt sich jedoch die gemessene Temperaturdifferenz von 16 K zwischen den Stationen 1/12 und 6/7 nicht wiederfinden (siehe Tabelle 2). Aufgrund dieser Ergebnisse scheint Glas 2 mit seinen Eigenschaften der effektiven Wärmeleitfähigkeit und Absorption für die Modellierung besser geeignet zu sein.

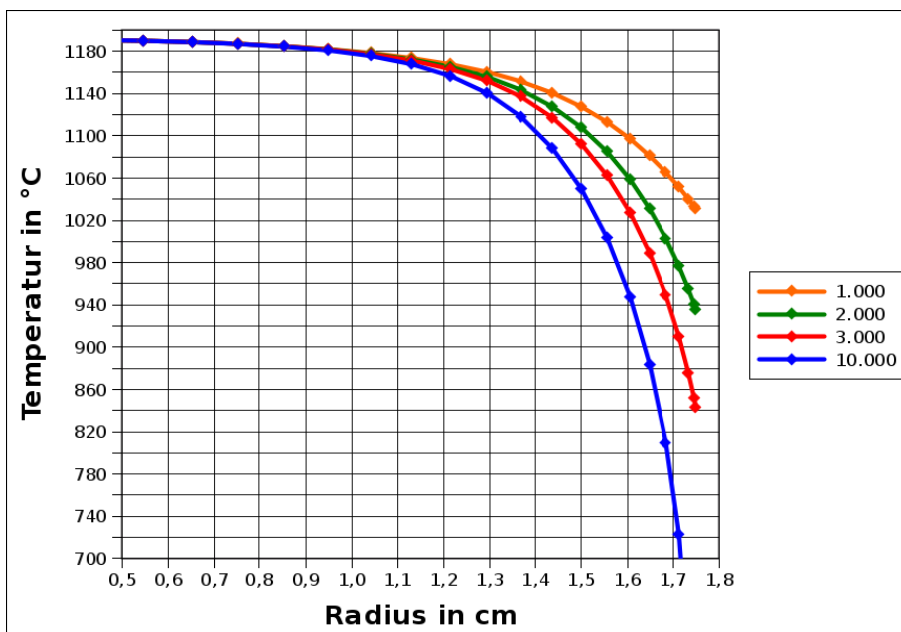


Bild 5: Vergleich von verschiedenen Werten für den Wärmeübergangskoeffizienten

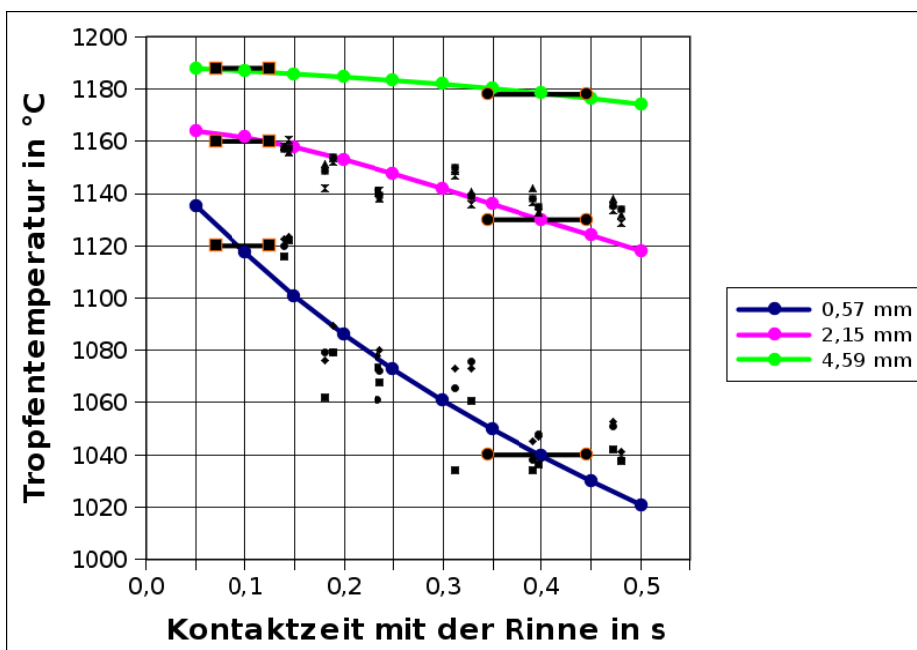


Bild 6: Tropfentemperatur für die Sichttiefen 0,57 mm, 2,15 mm und 4,59 mm, aufgetragen gegen die Kontaktzeit mit der Mittelrinne

In Bild 6 ist die Abkühlung des Tropfens für verschiedene Tiefen in Abhängigkeit von der Kontaktzeit mit der Mittelrinne dargestellt. Dazu sind die in der Modellierung berechneten Temperaturen gegen die Kontaktzeit aufgetragen. Die Querbalken in der Graphik repräsentieren Unsicherheiten im Bezug auf die Kontaktzeiten. In den oberflächenfernen Schichten lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen den Kontaktzeiten und den Temperaturen feststellen welcher in der äußeren Schicht leicht gestört ist. Bei den Berechnungen mit unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten ergab sich für die Wellenlänge $5,14 \mu\text{m}$ im Bezug auf die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Stationen, dass ein Wärmeübergangskoeffizient kleiner als $1000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ eine zu schwache Abhängigkeit der Temperatur von der Kontaktzeit in der äußeren Schicht des Tropfens bewirkt. Bei einem Wärmeübergangskoeffizient größer als $3000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ hingegen nimmt die Temperatur zu stark mit der Kontaktzeit ab.

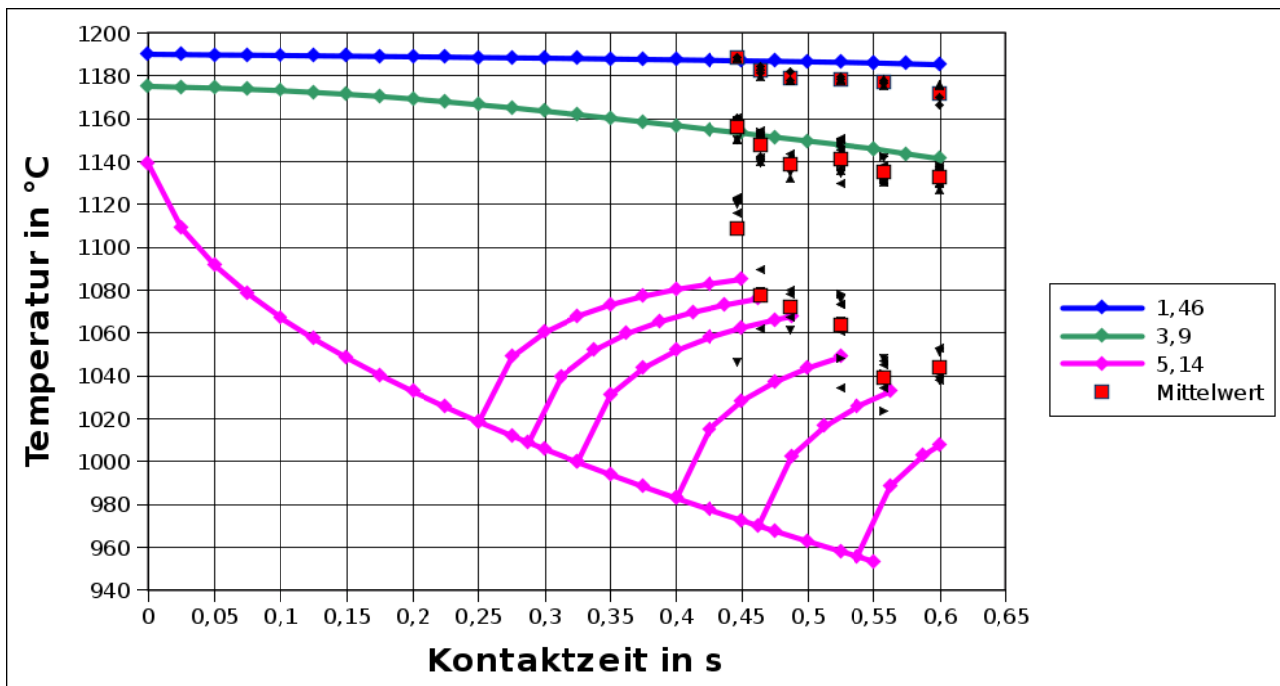


Bild 7: Wärmeverlust im Bereich der Mittelrinne und anschließende Rück erwärmung am Deflektor für Glas 2

In den ersten Ansätzen der Modellierung wurde der Kontakt des Tropfens mit dem Deflektor zunächst nicht berücksichtigt. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Rück erwärmung im Bereich des Deflektors auf der Kontaktseite der Mittelrinne einen starken Einfluss auf das Temperaturprofil des Glastropfens hat. Da die Rück erwärmung bei den im Deflektor gemessenen Temperaturen bereits wirksam war, wird diese im folgenden Abschnitt mit modelliert.

4.3 Rück erwärmung am Deflektor (3. Abschnitt)

Der letzte Abschnitt der Modellierung umfasst den Bereich des Deflektors und die dort auftretende Rück erwärmung des Tropfens. Wie schon im Abschnitt der Mittelrinne gibt es auch hier Unsicherheiten im Bezug auf die Intensität des Kontakts zwischen Tropfen und Deflektor und die Größe des Wärmeübergangskoeffizienten. Da bei der Modellierung bisher jedoch nur die Seite des Tropfens betrachtet wird, die mit der Mittelrinne in Kontakt war, haben diese Faktoren in diesem Abschnitt keinen Einfluss auf das Ergebnis und können vernachlässigt werden. Umso wichtiger sind jedoch die Kontaktzeiten für die einzelnen Stationen, da sie die Dauer und folglich die Intensität der Rück erwärmung bestimmen.

Für die 6 Stationspaare (1/12 bis 6/7) werden zunächst, entsprechend den Kontaktzeiten mit den Mittelrinnen, die Temperaturen aus dem 2. Abschnitt der Berechnung selektiert und jeweils auf einen neuen, längeren Tropfen übertragen. Für jedes Stationspaar wird nun, der Kontaktzeiten mit dem Deflektor entsprechend, die Rück erwärmung berechnet. Durch rekursives Anpassen des Wärmeübergangskoeffizienten im 2. Abschnitt der Modellierung, können die berechneten Endtemperaturen am Ende des Deflektors den Temperaturen der Messdaten angenähert werden.

In Bild 7 sind die Ergebnisse für Glas 2 dargestellt. Die schwarzen Punkte spiegeln die gemessenen Temperaturen der einzelnen Stationen wider, die roten Punkte repräsentieren die jeweiligen Mittelwerte. Für alle drei Wellenlängen sind die berechneten Temperaturen gegen die Kontaktzeit aufgetragen. Die Berechnungen des 2. Abschnitts der Modellierung wurden mit einem Wärmeübergangskoeffizienten von $1200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ durchgeführt. Für eine Wellenlängen von $1,46 \mu\text{m}$ ist ein Wärmeübergangskoeffizient dieser Größe ein-

deutig zu niedrig angesetzt, da die Temperaturdifferenz von 16 K zwischen den Stationen 1/12 und 6/7 nicht erreicht wird. Weitere Berechnungen haben gezeigt, dass ein Wärmeübergangskoeffizient von 1500 bis 2000 W/(m²·K) gute Ergebnisse liefert. Für 3,9 µm nähern sich die berechneten Temperaturen besser an die Messdaten an, jedoch muss auch hier ein höherer Wärmeübergangskoeffizient gewählt werden. Die beste Übereinstimmung mit den Temperaturmessungen brachte ein Wärmeübergangskoeffizient von 1800 W/(m²·K). Man sieht deutlich, dass die Rückwärmung im Bereich des Deflektors in diesen Tiefen kaum einen Einfluss auf die Temperaturen hat. Ganz anders hingegen sieht es für die äußere Tropfenschicht aus. Die untere Kurve spiegelt den Temperaturverlauf für eine Wellenlänge von 5,14 µm während des Kontakts mit der Mittelrinne wider. Für die 6 verschiedenen Stationspaare setzt zu unterschiedlichen Zeiten die Rückwärmung am Deflektor ein, wobei die Kontaktzeiten der Deflektoren ebenso spezifisch für die einzelnen Stationspaare sind, wie die Kontaktzeiten der Mittelrinnen. Die berechneten Temperaturen nähern sich für einen Wärmeübergangskoeffizienten von 1200 W/(m²·K) für die Stationen 5/8, 4/9 und 2/11 gut an die Messdaten an. Die Unterschiede zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturen an übrigen Stationen können zum einen auf Ungenauigkeiten bei den Kontaktzeiten zurückzuführen sein, als auch auf Ungenauigkeiten bei den Wärmeübergangskoeffizienten. Um die Unterschiede zwischen den einzelnen Stationen zu bewerten, müsste für jede Station getrennt der spezifische Wärmeübergangskoeffizient ermittelt werden.

5. Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

Im Rahmen der Berechnungen wurde der gesamte Weg eines Glastropfens, ausgehend von der Entstehung am Speiser bis zum Ende des Deflektors und die damit verbundenen thermischen Veränderungen in einem Tropfen, modelliert. Allgemein ist zu sagen, dass der gemessene und der gerechnete Temperaturverlauf gut übereinstimmen. Die Temperatur sinkt über die Tropfenlänge, da der untere Teil des Tropfens länger mit der Umgebung in Kontakt ist. Aufgrund von Strahlung und Wärmeverlust durch Kontakt sinkt die Temperatur von innen nach außen und im Kontakt mit der Rinne oder dem Deflektor sinkt sie schneller.

Die verschiedenen Berechnungsmethoden des 1. Modellierungsabschnitts haben gezeigt, dass das anfängliche Temperaturprofil nicht alleine durch Strahlung entsteht. Dem Tropfenstrang wird also bereits im Speiser ein Temperaturprofil aufgeprägt. Im 2. Abschnitt der Modellierung wurde deutlich, dass der Wärmeübergang im Kontakt mit dem Rinnenmaterial ab einer Sichttiefe von 0,75 cm keinen Einfluss mehr auf das Temperaturgefälle hat, was sich mit der in der Literatur angegebenen Sichttiefe von Blazek (1)], 1,15 cm für 1,46 µm, nicht vereinbaren lässt. Der 3. Modellierungsabschnitt hat gezeigt, dass die Rückwärmung am Deflektor auf der Seite, welche mit der Mittelrinne in Kontakt war, einen großen Einfluss auf das Tropfentemperaturprofil hat. Die unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten für die 3 Wellenlängen lassen auf eine zeitliche Änderung des Wärmeübergangs im Verlauf der Rinne schließen.

6. Literatur

- [1] Brinkmann, M.; Siedow, N. Korb, T.: Remote spectral temperature profile sensing. In: Loch, H.; Krause, D.: Mathematical simulation in glass technology. Berlin, Heidelberg, New York et al.: Springer 2002
- [2] NEDO-Projekt-Report des New Glass Forum.
- [3] Stebbins, J. F.; Carmichael, I. S. E.; Moret, L. K.: Contribution to Mineralogy and Petrology (1984) S. 131.

- [4] Coenen, M.: Dichtemessungen an Boratgläsern. *Glastechn. Ber.* 35 (1962) S. 14 – 21.
- [5] Coenen, M.: Dichte von "Scherbengläsern" bei hohen Temperaturen. *Glastechn. Ber.* 39 (1966) S. 81 – 89.
- [6] Blazek, A.; Endrys, J.; Kada, J.; Stanel, J.: Strahlungswärmeleitfähigkeit von Glas – Einfluss der Glaszusammensetzung auf seine Wärmedurchlässigkeit. *Glastechnischer Bericht* 1976, 49, S. 75 – 81
- [7] Endrys, J.; Geotti-Bianchini, F.; Riu, L. de: Study of the high-temperature spectral behavior of container glass. *Glastech. Ber. Glass Sci. Technol.* 70 (1997) 126-136
- [8] Dhondt, G.: *The finite element method for three-dimensional thermomechanical applications.* Munich: Wiley & Sons 2004