

HVG-Mitteilung Nr. 2139

IGF/AiF/HVG-Forschungsvorhaben Nr. 15223 N "Nutzung der Verteilerrinnen von IS-Maschinen für die thermische Konditionierung von Glastropfen"

Vortrag im Fachausschuss IV der DGG am 12.3.2008 in Würzburg

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

1. Einleitung

Zwischen Speiser und Vorform ändert sich die Temperaturverteilung in einem Glastropfen unkontrolliert durch Abstrahlung, Konvektion und den Kontakt mit kalten Werkzeugen und Maschinenteilen. Dadurch werden Temperaturinhomogenitäten induziert, die zu einer ungleichmäßigen Glasverteilung im Produkt führen. Da die Festigkeit eines Behälters durch die Bereiche mit der geringsten Wanddicke bestimmt wird, ließen sich durch das Erzielen einer gleichmäßigen Wanddicke Rohstoffe und Energie einsparen. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollen die Temperaturverteilung der Glastropfen und ihre Änderung zwischen dem Tropfenschnitt und der Vorform an einer IS-Maschine erfasst und Mittel zu ihrer gezielten Beeinflussung erarbeitet werden. Basis dafür ist die Verknüpfung kalorimetrischer Messungen und optischer Temperaturmessungen mit einer Modellierung der Abkühlung des Tropfens.

2. Theoretische Grundlagen

Das Temperaturfeld in einem Körper kann durch Lösung der Wärmetransportgleichung berechnet werden. Für einen semitransparenten Körper muss die Wärmetransportgleichung um die Anteile absorbierter und emittierter Strahlung erweitert werden:

$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \nabla^2 T + W_{\text{abs}} - W_{\text{emis}} = k_{\text{eff}} \cdot \nabla^2 T \quad (1)$$

mit T: Temperatur, t: Zeit, k: Wärmeleitfähigkeit, c_p : spezifische Wärmekapazität, ρ : Dichte, W_{abs} : absorbierter Strahlungsfluss und W_{emis} : emittierter Strahlungsfluss. In der einfachsten Näherung kann der Strahlungsanteil durch eine effektive Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt werden. Es zeigt sich, dass diese Näherung für Braunglas zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Die Wärmetransportgleichung enthält die Stoffdaten Wärmeleitfähigkeit $k_{\text{eff}}(T)$, die spezifische Wärmekapazität $c_p(T)$ und die Dichte $\rho(T)$. Weiter werden für die Berechnung des Temperaturfeldes die Randbedingungen für die Wärmeabgabe benötigt. Die Wärmeabgabe erfolgt entweder durch Strahlung:

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

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

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

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 verschiedenen Medien benötigt. Die Berechnung der Temperaturverteilung wurde mit der freien FEM-Software Calculix 1.7 durchgeführt.

3. Stoffdaten

Die benötigten Stoffdaten für die Wärmeleitfähigkeit k_{eff} [1], die spezifische Wärmekapazität c_p [2] und die Dichte ρ [3, 4, 5] wurden in der Literatur recherchiert. Das Ergebnis der Recherche ist in den Bildern 1 – 3 zusammengefasst. Die Wärmeleitfähigkeit von Gläsern wird bei Temperaturen über 600 °C durch den Wärmetransport durch Strahlung dominiert. Während die Wärmeleitfähigkeit durch Phononen bei Schmelztemperatur etwa 1 W/mK beträgt, steigt die Wärmeleitfähigkeit durch Strahlung zwischen 600 °C und 1300 °C auf bis zu 180 W/mK an. Die Höhe der Wärmeleitfähigkeit hängt von der Transparenz der Glasschmelze ab. Für Braungläser mit einem Eisengehalt von ca. 0,5 % liegt die Wärmeleitfähigkeit bei 1300 °C zwischen 20 und 40 W/mK. Die rote Linie in Bild 1 zeigt die für die FEM-Rechnungen gewählte Wärmeleitfähigkeit.

Bild 2 zeigt Werte für die spezifische Wärmekapazität für drei verschiedene Gläser [2] sowie die bei den FEM-Rechnungen eingesetzten Werte als grüne Linie. Für die FEM-Rechnungen wird nicht die üblicherweise angegebene mittlere spezifische Wärmekapazität benötigt, sondern die spezifische Wärmekapazität bei gegebener Temperatur.

Die Dichte ist oberhalb von T_G deutlich von der Temperatur abhängig. Werte für Glaszusammensetzungen ähnlich der eines Behälterglases zeigt Bild 3. Die FEM-Rechnungen werden zur Zeit mit einem starren Modell durchgeführt. Eine thermische Volumenänderung würde bei der Weiterverarbeitung der Rechenergebnisse mit dem zurzeit benutzten Programm zu einer falschen Berechnung des Wärmehalts führen. Um das zu vermeiden wird mit einer konstanten Dichte von 2,35 g/cm³ gerechnet.

Für den Emissionsgrad gibt es keine Literaturwerte, lediglich Anhaltswerte einiger Pyrometerhersteller. Ein Wert von 0,9 liefert sinnvolle Ergebnisse. Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

4. Ergebnisse

Bild 4 zeigt die Ergebnisse von Temperaturmessungen an einem Braunglastropfen, die mit einem Pyrometer bei 3,9 μm und mit einer Thermokamera bei 8 - 12 μm aufgenommen wurden. Die Messergebnisse mit der Kamera erfassen die Oberflächentemperatur, die Messungen mit dem Pyrometer ergeben eine Temperatur, der sich eine Sichttiefe von 5 mm \pm 2 mm zuordnen lässt. Die Oberflächentemperatur ist

merklich niedriger als die Temperatur im Inneren des Tropfens. Bild 4 zeigt auch, dass die Temperaturverteilung über den Tropfenumfang deutlich inhomogen ist.

Um die Temperaturverteilung berechnen zu können, muss zunächst der zeitliche Verlauf der Tropfenentstehung definiert werden. Für eine erste Näherung wird der Tropfen als starrer Strang betrachtet, der kontinuierlich den Speiser verlässt. Die Austrittsgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Tropfendurchmesser und der Tonnage. Der Tropfenaustritt ist in Bild 5 skizziert. Die Zeit, in der der Tropfen Wärme durch Strahlungsaustausch mit der Umgebung abgibt setzt sich zusammen aus der Vorlaufzeit (t_{RS}), die sich aus dem Abstand zwischen Tropfring und Schere ergibt, der Auslaufzeit (t_T), die der Tropfenlänge entspricht sowie der Fallzeit (t_F) bis zum Erreichen der Temperaturmessung. Die in Bild 4 gemessenen Temperaturen entsprechen entlang der Oberfläche Positionen bei $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ und $\frac{3}{4}$ der Tropfenlänge.

Bild 6 zeigt die gemessenen Temperaturen und vier verschiedene Ansätze zur Beschreibung der Temperaturverteilung. Die unterschiedlichen Positionen auf der Tropfenoberfläche sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet. Der Abstand zwischen den durchgezogenen und den gestrichelten Linien entspricht der Unsicherheit bezüglich des Abstandes zwischen Tropfring und Schere sowie der genauen Position der Temperaturmessung. Auf der rechten Seite folgt die Abkühlung sehr gut einer ausschließlichen Wärmeabgabe durch Strahlung. Die linke Seite ist dagegen signifikant kälter als einer Wärmeabgabe durch Strahlung entsprechen würde. Bild 6b zeigt auf der linken Seite eine Wärmeabgabe, die einem leichten Anblasen mit Luft entsprechen würde ($50 \text{ W/m}^2\text{K}$), Bild 6c wurde für starkes Anblasen berechnet ($290 \text{ W/m}^2\text{K}$). Werte für die entsprechenden Wärmeübergangskoeffizienten wurden Tabelle 1 entnommen [6]. Starkes Anblasen würde einen steileren Temperaturgradienten an der Oberfläche erwarten lassen als den Messungen entspricht. Bild 6d zeigt einen Ansatz, bei dem eine Abkühlung an der Tropfenoberfläche im Speiseraustritt zu Grunde gelegt wurde. Auf diese Weise lässt sich das gemessene Temperaturprofil gut annähern. Entscheidend für den Temperaturgradienten ist im Falle einer Temperaturinhomogenität die Wärmeleitfähigkeit und die Zeit seit der Erzeugung der Temperaturinhomogenität. Als Zeitpunkt der Erzeugung der Temperaturinhomogenität wurde im vorliegenden Fall der Austritt des Glasstranges aus dem Tropfring angenommen.

5. Zusammenfassung

Erste Vergleiche von Messungen und Rechnungen zeigen, dass sich die zeitliche Entwicklung der Tropfentemperaturen mit einem einfachen Modellansatz gut beschreiben lässt. Neben Temperaturänderungen durch Wärmeabgabe über Strahlung sind in einzelnen Tropfenbereichen eindeutige Temperaturinhomogenitäten identifizierbar, die vermutlich aus dem Speiser eingetragen werden.

6. Literatur

- [1] Blazek, A.; Endrys, J.; Kada, J.; Stanek, J.: Strahlungswärmeleitfähigkeit von Glas-Einfluss der Glaszusammensetzung auf seine Wärmedurchlässigkeit. *Glastech. Ber.* 49 (1976) 75-81.
- [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] Groth, C.; Müller, G.: *FEM für Praktiker – Band 3: Temperaturfelder.*

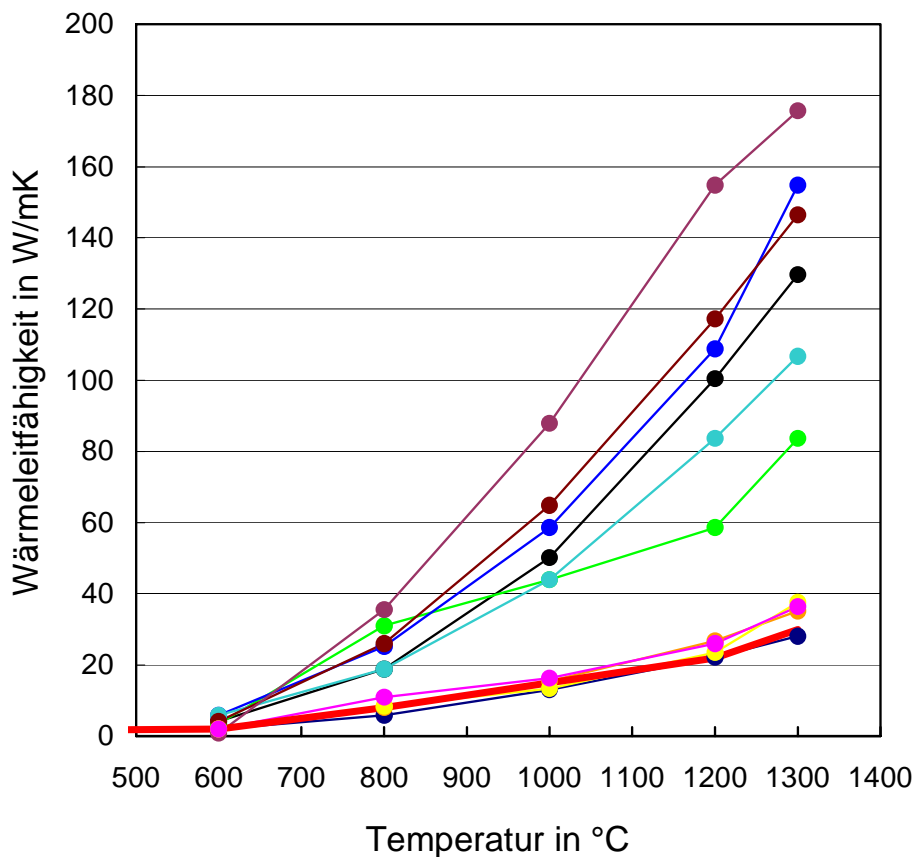
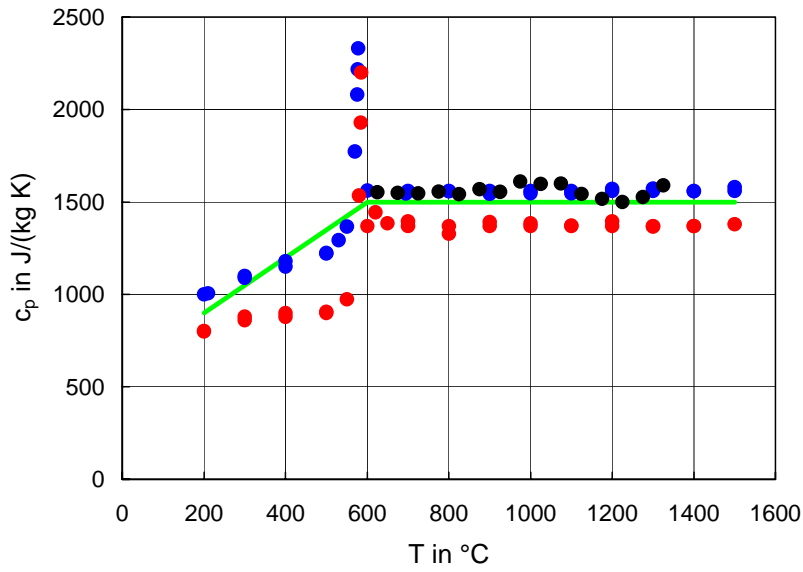


Bild 1: Wärmeleitfähigkeiten in Glasschmelzen [1].



SiO ₂	70,9	72,1	74,6
Al ₂ O ₃	1,6	1,5	
MgO	3,9	2	
CaO	8,8	10	9,3
Na ₂ O	13,3	13,4	16,1
K ₂ O	0,7	0,5	
As ₂ O ₃		0,5	
Fe ₂ O ₃	0,5		
SO ₃	0,2		

Bild 2: Spezifische Wärmekapazität [2].

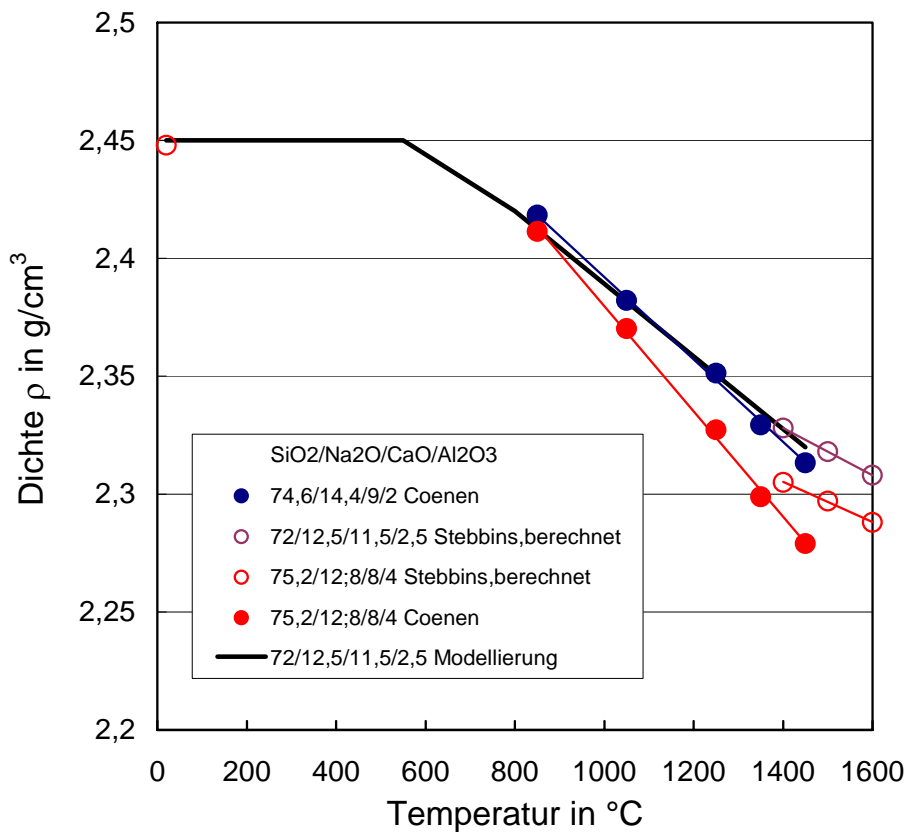


Bild 3: Dichte als Funktion der Temperatur[3, 4, 5].

Anwendungsfall (Geschwindigkeit v in [m/s])	Anhaltswert für α [W/(m ² K)]
Luft in geschlossenen Räumen an der Innenseite der Wand	8
Luft an der Außenseite der Wand	23
Luft an der Außenseite der Wand bei Sturm bis zu	116
Luft, ruhend, senkrecht zu einer glatten Wand	3.5 ... 35
Luft, mäßig bewegt, senkrecht zu einer glatten Wand	23 ... 70
Luft, kräftig bewegt, senkrecht zu einer glatten Wand	68 ... 290
Luft, mäßig bewegt ($v < 5$ m/s), längs einer glatten Wand	$5.7 + 4 v$
Luft, schnell bewegt ($v > 5$ m/s), längs einer glatten Wand	$7.1 v^{0,78}$
Luft, mäßig bewegt ($v < 5$ m/s), längs einer rauhen Wand	$6.2 + 4.2 v$
Luft, schnell bewegt ($v > 5$ m/s), längs einer rauhen Wand	$7.5 v^{0,78}$
Wasser in Kesseln und Behältern	580 ... 2300
Strömendes Wasser in Rohren	2300 ... 4700
Siedendes Wasser in Rohren	4700 ... 7000
Kondensierender Wasserdampf	6000 ... 12000

Tabelle 1: Anhaltswerte für den Wärmeübergangskoeffizienten α [6].

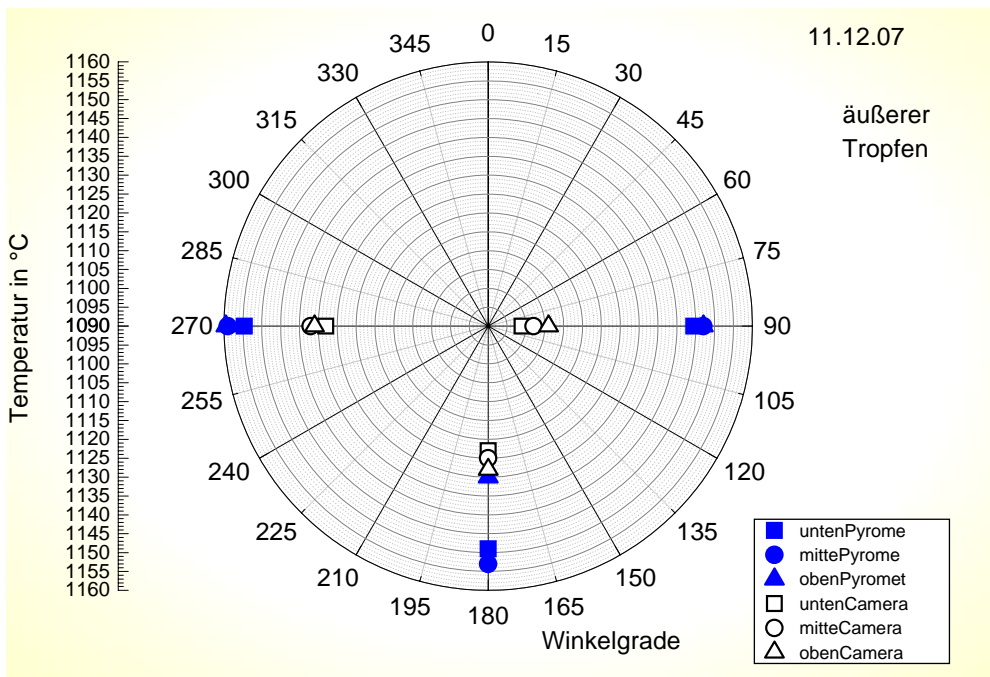


Bild 4: Temperaturmessung mit einem Pyrometer (3,9 μm) und einer Wärmebildkamera (8 – 12 μm) an einem Braunglastropfen.

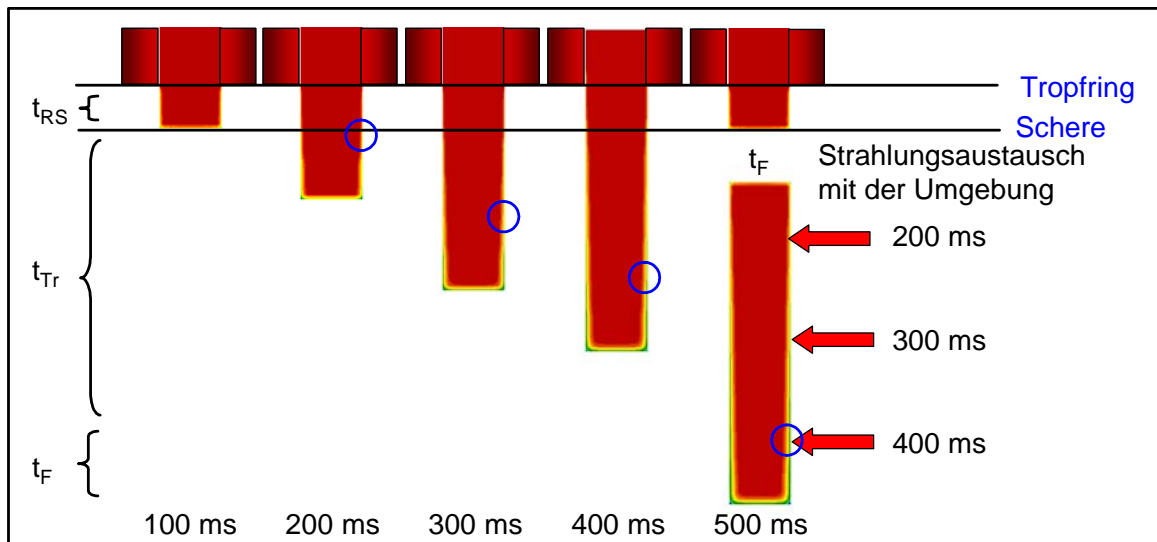
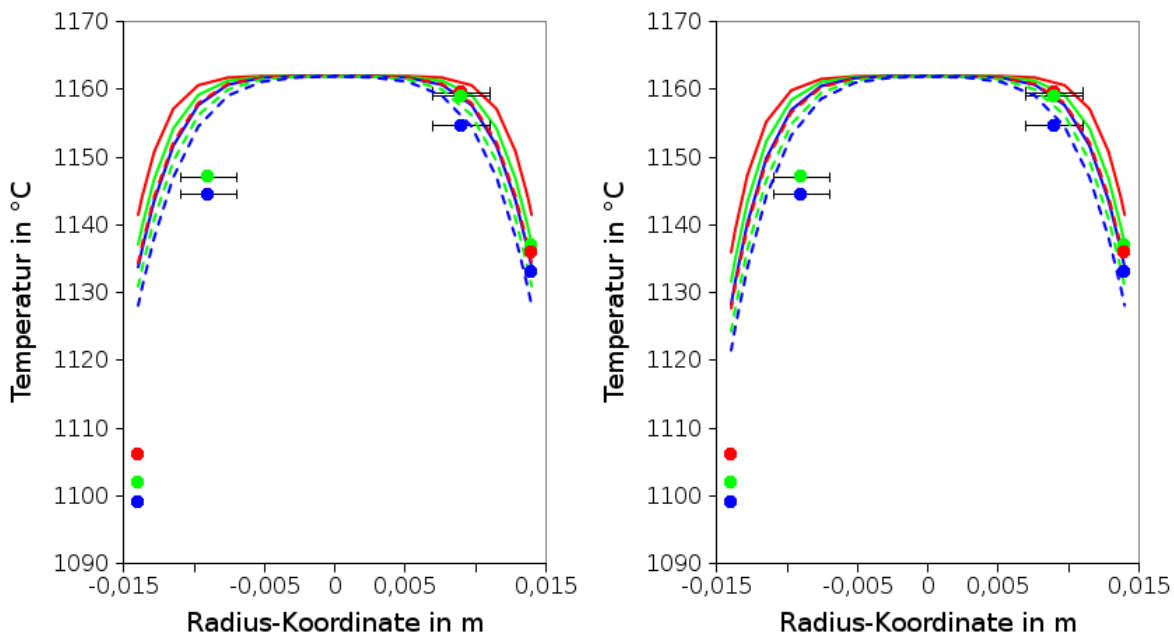
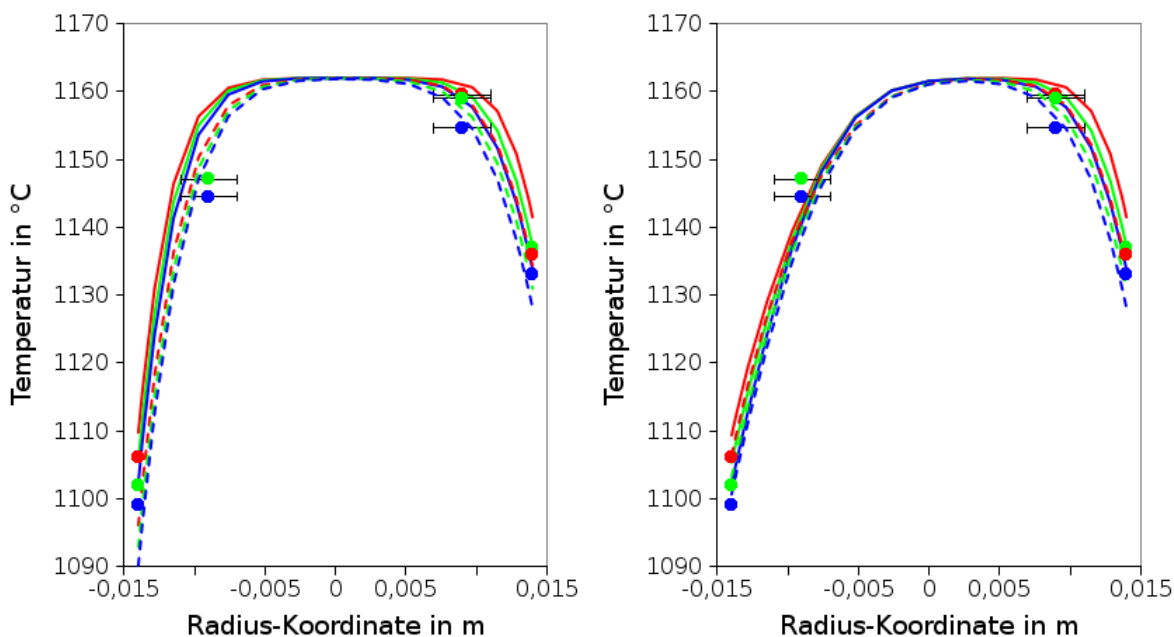


Bild 5: Zeitlicher Ablauf der Tropfenentstehung.



a: Strahlung

b: leichtes Anblasen ($\alpha = 50 \text{ W/m}^2 \text{ K}$) links und Strahlung rechts



c: starkes Anblasen ($\alpha = 290 \text{ W/m}^2 \text{ K}$) links und Strahlung rechts

d: Temperaturinhomogenität am Speiser links und Strahlung rechts

Bild 6: Modellierung der Temperaturverteilung und Vergleich mit den Messergebnissen aus Bild 4. Position auf der Tropfenoberfläche, rot: oben, grün: Mitte, blau: unten. Durchgezogene und gestrichelte Linien sind modelliert, der Abstand entspricht der Unsicherheit bezüglich des Abstands Tropftring / Schere und der Position der Temperaturmessung.