

Nutzung der Verteilerrinnen von IS-Maschinen für die thermische Konditionierung von Glas-  
tropfen (AiF-Nr. 15223 N)

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

Vortrag im Fachausschuss IV der DGG am 18. März 2009 in Würzburg

### 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. Aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit der Maschine erfassen Temperaturmessungen immer nur einen Teil der Tropfenoberfläche. Um die Temperaturverteilung im Glastropfen möglichst vollständig zu erfassen, müssen die Temperaturen zwischen den Messpunkten rechnerisch interpoliert werden. Hierfür werden die Temperaturänderungen beim Abkühlen mit einer FEM-Software modelliert. Das Konzept der Auswertung der Untersuchungsergebnisse ist in Bild 1 dargestellt. Ziel der Messungen ist die Erstellung zeitabhängiger Temperaturprofile, aus denen die Wärmeübergangskoeffizienten für den Kontakt mit den Verteilerrinnen abgeleitet werden können.

### 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:

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

mit  $T$ : Temperatur,  $t$ : Zeit,  $k$ : Wärmeleitfähigkeit,  $c_p$ : spezifische Wärmekapazität,  $\rho$ : Dichte,  $W_{\text{abs}}$ : absorbierter Strahlungsfluss und  $W_{\text{emis}}$ : emittierter Strahlungsfluss. In der einfachsten Näherung kann der Strahlungsanteil durch eine effektive Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt werden:

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

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:

$$q = \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (3)$$

mit  $q$ : Wärmestromdichte,  $\varepsilon$ : Emissionsgrad,  $\sigma$ : Stefan-Boltzmann-Konstante,  $T$ : Temperatur und  $T_0$ : Umgebungstemperatur oder durch Konvektion bzw. Kontakt:

$$q = \alpha (T - T_0) \quad (4)$$

$q$ : Wärmestromdichte,  $\alpha$ : Wärmeübergangskoeffizient,  $T$ : Temperatur und  $T_0$ : Umgebungstemperatur. Die Berechnung der Temperaturverteilung wurde mit der freien FEM-Software Calculix 1.7 durchgeführt [1].

### 3. Ergebnisse der Temperaturmessungen

In Tabelle 1 sind die bisher im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeföhrtten Messungen zusammengestellt. Dieser Beitrag präsentiert die Auswertung der Messungen vom Oktober 2008. Bei dieser Messung wurden mit Pyrometern bei den Wellenlängen 1,46  $\mu\text{m}$ , 3,9  $\mu\text{m}$  und 5,14  $\mu\text{m}$  Temperaturmessungen an den fallenden Tropfen vorgenommen.

Bild 2 zeigt die Ergebnisse der Temperaturmessung ca. 60 cm unterhalb der Schere. Zwischen zwei Messungen im Abstand einiger Stunden variieren die Ergebnisse der kurzwelligen Pyrometer nur um rund 1 – 2 K, die bei 5,14  $\mu\text{m}$  aufgenommenen Temperaturen variieren um bis zu 10 K. Bild 3 zeigt die Temperaturen, die am Ende der Deflektorrinne gemessen wurden. Die beim Blick in die Deflektorrinne sichtbare Oberfläche des Glaspostens war zuvor mit der Mittelrinne in Kontakt. Durch die längeren Kontaktzeiten ergibt sich für die Außenstationen eine stärkere Abkühlung als für die inneren Stationen. Diese Abkühlung wird bei allen eingesetzten Wellenlängen erfasst.

### 4. Modellrechnungen

Für die Lösung der Gleichungen 2 bis 4 werden Zahlenwerte für

- die Wärmeleitfähigkeit  $k_{\text{eff}}(T)$ ,
- die spezifische Wärmekapazität  $c_p$ ,
- die Dichte  $\rho$ ,
- den Emissionsgrad  $\varepsilon$  und
- den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$

benötigt. Die Wärmeübergangskoeffizienten ergeben sich als Ergebnis der Kombination von Messung und Modellrechnung. Die Daten für die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  [2] und die Dichte  $\rho$  [3, 4, 5] lassen sich anhand der Zusammensetzung gut in der Literatur recherchieren. Anders die Wärmeleitfähigkeit, die für das jeweils aktuelle Glas gemessen werden müsste. Den dafür erforderlichen sehr großen Aufwand versucht man jedoch in der Regel zu umgehen, zumal sich die Eigenschaften der Schmelze mit zunehmender Messdauer oder beim erneuten Aufschmelzen, wie es bei Proben aus der industriellen Fertigung erforderlich ist, merklich verändern.

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. In der Literatur wurden zwei Braungläser sowohl bezüglich ihrer spektralen Eigenschaften als auch ihrer Wärmeleitfähigkeiten untersucht [6, 7]. Diese Daten wurden für die Modellrechnungen eingesetzt.

Für den Emissionsgrad kann aufgrund des Reflexionsverhaltens an der Tropfenoberfläche mit guter Näherung 0,96 angesetzt werden.

Für die zeitliche Zuordnung der Temperaturmessungen muss die Tropfenbewegung in der Verteilerrinne dargestellt werden. Die Bewegungsgleichungen für den freien Fall und eine schräge Ebene lauten

$$m \frac{ds^2}{dt^2} = mg \tag{5}$$

und

$$m \frac{ds}{dt^2} = m \cdot \sin(\alpha) \cdot g - \mu_R \cdot m \cdot \cos(\alpha) \tag{6}$$

mit der Strecke  $s$ , der Masse  $m$ , der Zeit  $t$ , der Erdbeschleunigung, dem Neigungswinkel  $\alpha$  der Mittelrinne und dem Reibungskoeffizienten  $\mu_R$ . Da  $\mu_R$  konstant ist lässt sich die rechte Seite von Gleichung 2 zu einer Beschleunigung  $b_2$  zusammenfassen. Zweimaliges Integrieren der Bewegungsgleichung ergibt

$$s = \frac{1}{2} b_i t^2 + v_{0i} t + s_{0i} \quad (7)$$

Für jeden Rinnenabschnitt sind die Längen  $s$ , in denen eine bestimmte Beschleunigung  $b_i$  gilt, durch die Länge der Rinnen vorgegeben. Auflösen von Gleichung 7 nach  $t$  ergibt

$$t = \frac{-v_{0i} \pm \sqrt{v_{0i}^2 - 2b_i(s_{0i} - s_{0i+1})}}{g} \quad (8)$$

Die  $v_{0i}$  und  $s_{0i}$  ergeben sich aus den Endpunkten des vorhergehenden Rinnenabschnitts. Bezieht man die Geschwindigkeiten auf die Fallhöhe, so erhält man einen einheitlichen Geschwindigkeitsverlauf. Dieser wird in Bild 4 mit den Ergebnissen der Geschwindigkeitsmessung mit einem Speedgob verglichen. Bis zum Ende der Mittelrinne stimmen die Ergebnisse gut überein. Die in der Deflektorrinne gemessenen Tropfengeschwindigkeiten sind deutlich niedriger als die errechneten. Offensichtlich werden die Tropfen beim Übergang von der Mittelrinne in die Deflektorrinne stark abgebremst. Während des Transports durch das Rinnensystem erfahren die Tropfen eine Längung bis zum Doppelten der Anfangslänge. Dabei zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Tropfenlänge im Deflektor von der Länge der Mittelrinne. Die FEM-Rechnungen werden mit einem starren Modell durchgeführt. Um die Änderung des Oberflächen/Volumenverhältnisses zu berücksichtigen, werden die Tropfendimensionen am Anfang der Mittelrinne und im Deflektor an die gemessenen Längen angepasst.

## 5. Vergleich Messung/Modellrechnung

Um die Messergebnisse und die Modellrechnungen zu kombinieren, müssen den gemessenen Temperaturen Sichttiefen zugeordnet werden. Nach der Bedingung von Eddington-Barbier lässt sich die Sichttiefe  $d$  des Pyrometers aus dem Absorptionsspektrum der Glasschmelze ablesen:

$$d = \frac{1}{k(T, \lambda)} \quad (9)$$

Das Hochtemperaturspektrum des untersuchten Glases liegt nicht vor. Aus Spektren vergleichbarer Gläser lassen sich die Sichttiefen in Tabelle 2 abschätzen [6, 7]. Mit Hilfe der Bewegungsgleichungen lassen sich die Kontaktzeiten der Glastropfen mit der Mittelrinne berechnen. In Bild 5 wurden die Modellrechnungen durch Variation der Wärmeübergangskoeffizienten und der Sichttiefen an die Messergebnisse angepasst. Die Anpassung gelingt besser mit den Daten aus [7]. Dennoch sind die angepassten Sichttiefen deutlich kleiner als die nach Eddington-Barbier berechneten. Welchen Anteil an der Differenz die Näherungen von Eddington-Barbier und welchen Anteil zu starke Vereinfachungen der Modellierung haben muss in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

Aus dem angepassten Modell lassen sich die Temperaturänderungen in Abhängigkeit von der Zeit bzw. Tropfenposition berechnen. Die Temperaturverteilung in den vier Phasen des Tropfentransport zeigt Bild 6. Das Glas tritt mit einem durch den Speiser aufgeprägten Profil aus. In der ersten Phase zwischen Austreten und Schnitt und anschließend in der zweiten Phase während des freien Falls verliert der Tropfen durch Strahlung Wärme. In der dritten Phase wird der Tropfen einseitig durch den Kontakt mit der Mittelrinne abgekühlt. Anschließend wird in der vierten Phase die Kontaktseite mit der Deflektorrinne abgekühlt, während an der Seite, die mit der Mittelrinne in Kontakt war, eine Wiedererwärmung stattfindet.

## 6. Änderungen von Betriebsparametern

Während der Messungen wurde auch der Einfluss ausgewählter Betriebsparameter untersucht. Bild 7 zeigt den Einfluss der Scoop-Besprühung auf die am Ende des Deflektors gemessenen Temperaturen. Die Scoop-Besprühung besteht aus Düsen im Gehäuse, das den oberen Teil der Scoop-Rinne umgibt. Mit diesen Düsen wird zyklisch Wasser, Öl oder eine Emulsion eingedüst, wobei der Zyklus so gewählt wird, dass die nachfolgend beaufschlagte Station bei jedem Zyklus wechselt. Für die Untersuchungen wurde der Zyklus zunächst für 4 Stunden um 65 % verlängert (weniger Wasser) und anschließend auf 10 % des Ausgangszustands verringert (mehr Wasser). Der zweite Zustand erwies sich als instabil und musste nach kurzer Zeit wieder abgebrochen werden. Bild 7 zeigt, dass sowohl eine Erhöhung als auch eine Verringerung der Wasserzugabe zu einer stärkeren Abkühlung der Tropfenoberfläche führt. Offensichtlich ist bei der üblichen Einstellung der Einfluss der Abkühlung durch das eingespritzte Wasser noch gering im Verhältnis zur isolierenden Wirkung des entstehenden Dampfpolsters.

Bild 8 zeigt die gemessenen Temperaturen nach einer Produktänderung mit einer damit verbundenen Durchsatzänderung. Nach der Produktionsänderung zeigt die Temperaturverteilung über alle Stationen im Gegensatz zum Ausgangszustand ein asymmetrisches Bild. Ob die Ursache in einer Änderung der Wärmeübergangskoeffizienten oder der Rinnentemperatur liegt, muss in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

## 7. Literatur

- [1] Dhondt, G.: The finite element method for three-dimensional thermomechanical applications. Chichester: John Wiley, 2004
- [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.; Stanek, J.: Strahlungswärmeleitfähigkeit von Glas-Einfluss der Glaszusammensetzung auf seine Wärmedurchlässigkeit. Glastechn. Ber. 49 (1976) 75-81.
- [7] Endrys, J.; Blazek, A.; Ederova, J.: Experimental determination of the effective thermal conductivity of glass by steady-state method. Glastechn. Ber. 66 (1993), S. 151.

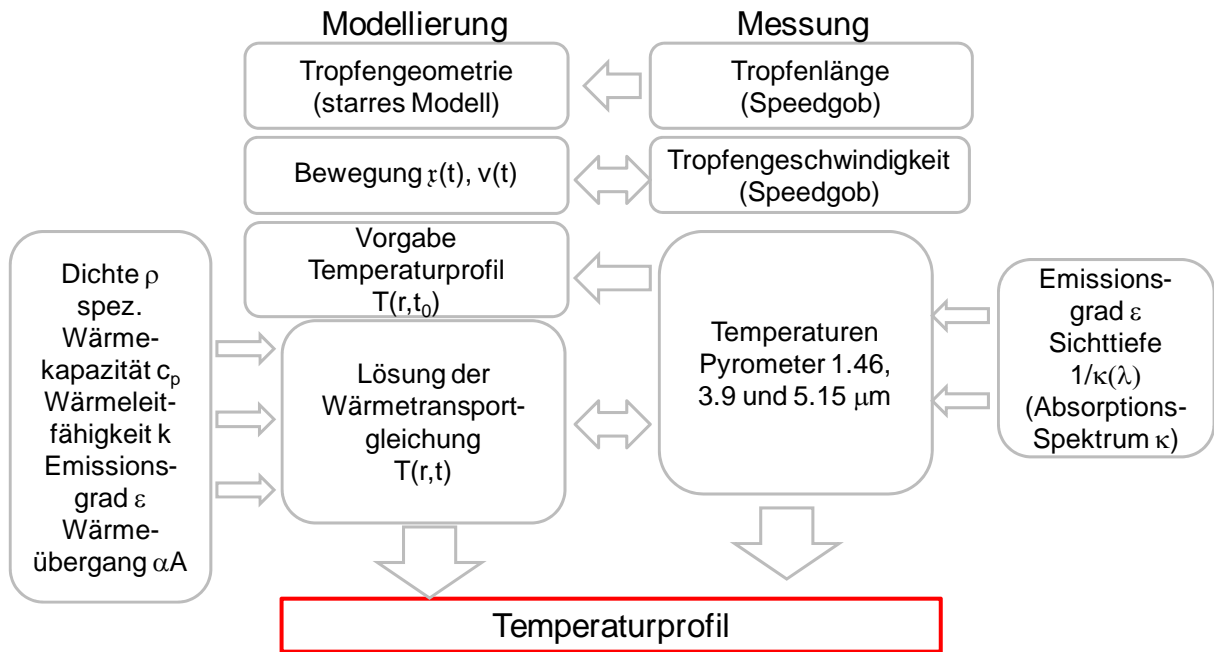


Bild 1: Konzept für die Auswertung der Messergebnisse.

| Messung                                | Inhalt                                                                                                                | eingesetzte Geräte                                                                                    | geänderte Parameter                                      |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 12.2007                                | Braunglas, orientierende Messungen am Tropfen                                                                         | Thermokamera<br>Pyrometer 3.9 µm                                                                      |                                                          |
| 4.2008<br>Bad Wurzach<br>Maschine 2/1  | Braunglas, Temperaturen und Wärmeinhalte unter Schere, in Mittelrinne und Deflektorrinne, nur zwei Stationen (S12+S8) | Kalorimeter<br>Thermokamera<br>Pyrometer 1.46 und 3.9 µm<br>Speedgob (SGO)                            |                                                          |
| 10.2008<br>Bad Wurzach<br>Maschine 2/1 | Braunglas, Temperaturen unter Schere, in Mittelrinne und Deflektorrinne, alle Stationen                               | Pyrometer 1.46, 3.9 und 5.14 µm<br>Speedgob (SGO)<br>Hochgeschwindigkeitskamera (SGO)                 | Scoop-Besprühung<br>Rinnenbeschichtung<br>Artikelwechsel |
| 3.2009<br>Bad Wurzach<br>Maschine 7/2  | Grünglas, Temperaturen unter Schere und in Deflektorrinne, ausgew. Mittelrinnentemperaturen,                          | Thermokamera<br>Pyrometer 1.46, 3.9 und 5.14 µm<br>Speedgob (HVG)<br>Hochgeschwindigkeitskamera (SGO) | Rinnenbeschichtung<br>Artikelwechsel                     |

Tabelle 1: Bisherige Messkampagnen.

| Pyrometerwellenlänge in $\mu\text{m}$ | Sichttiefe Blazek 1976 in mm | berechnete Sichttiefe in mm | Sichttiefe Endrys 1997 in mm | berechnete Sichttiefe in mm |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1,46                                  | 12                           | 4,6                         | 4,0                          | 3,0                         |
| 3,9                                   | 4                            | 2,2                         | 2,5                          | 1,3                         |
| 5,14                                  |                              | 0,6                         | < 1                          | 0,3                         |

Tabelle 2: Sichttiefen unterschiedlicher Braungläser.

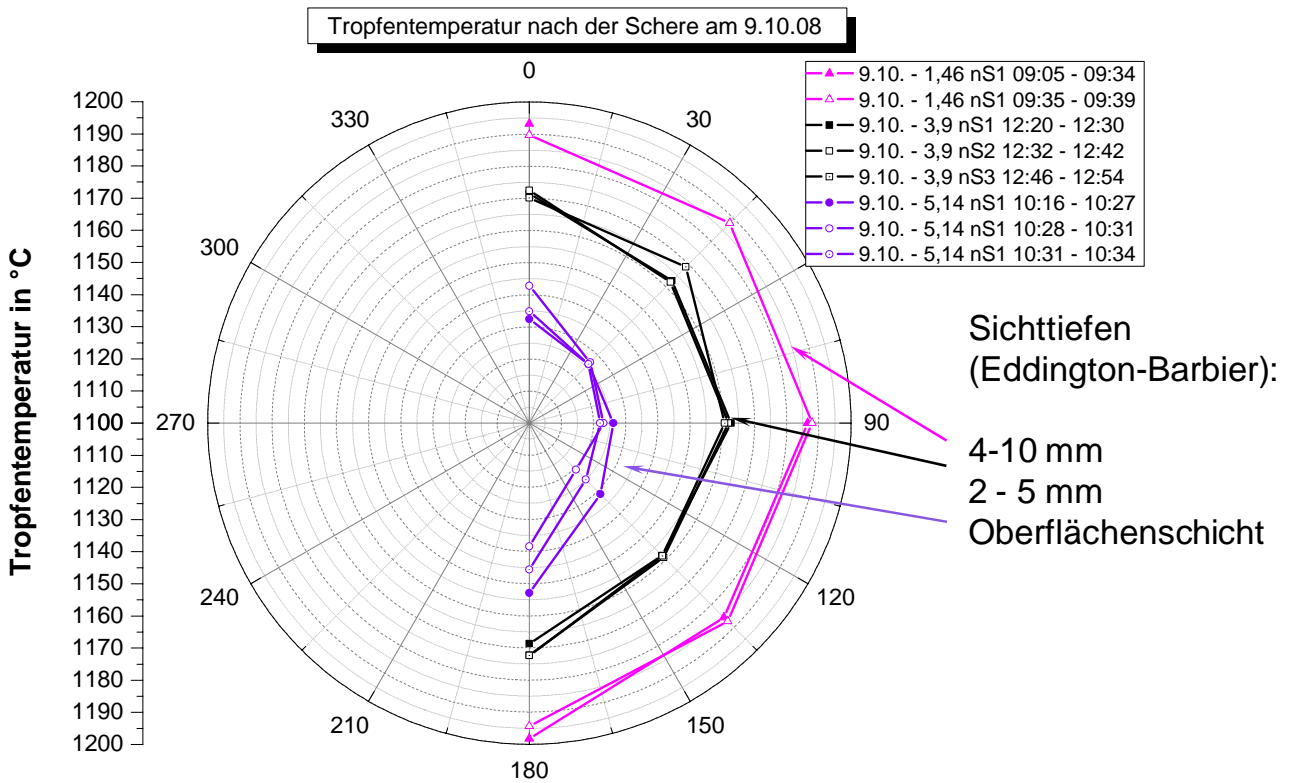


Bild 2: Temperaturen am Tropfen ca. 60 cm unterhalb der Schere.

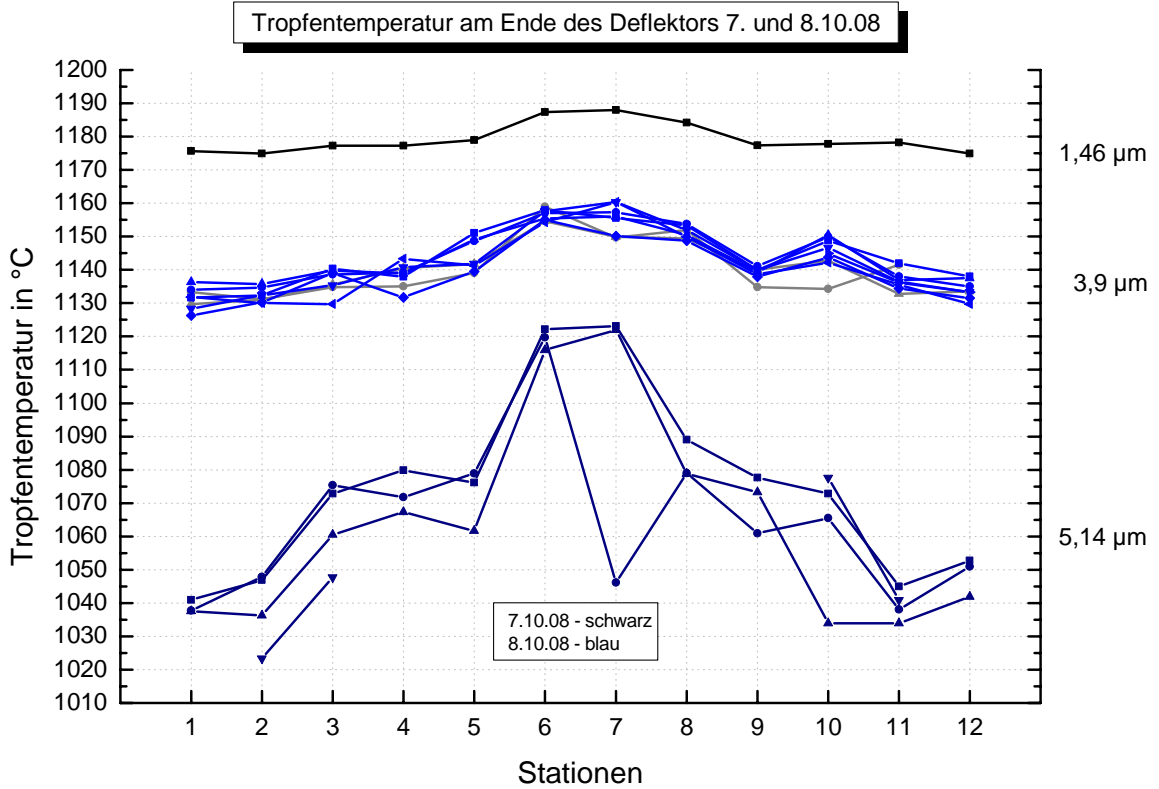


Bild 3: Temperaturen am Ende der Deflektorrinne.

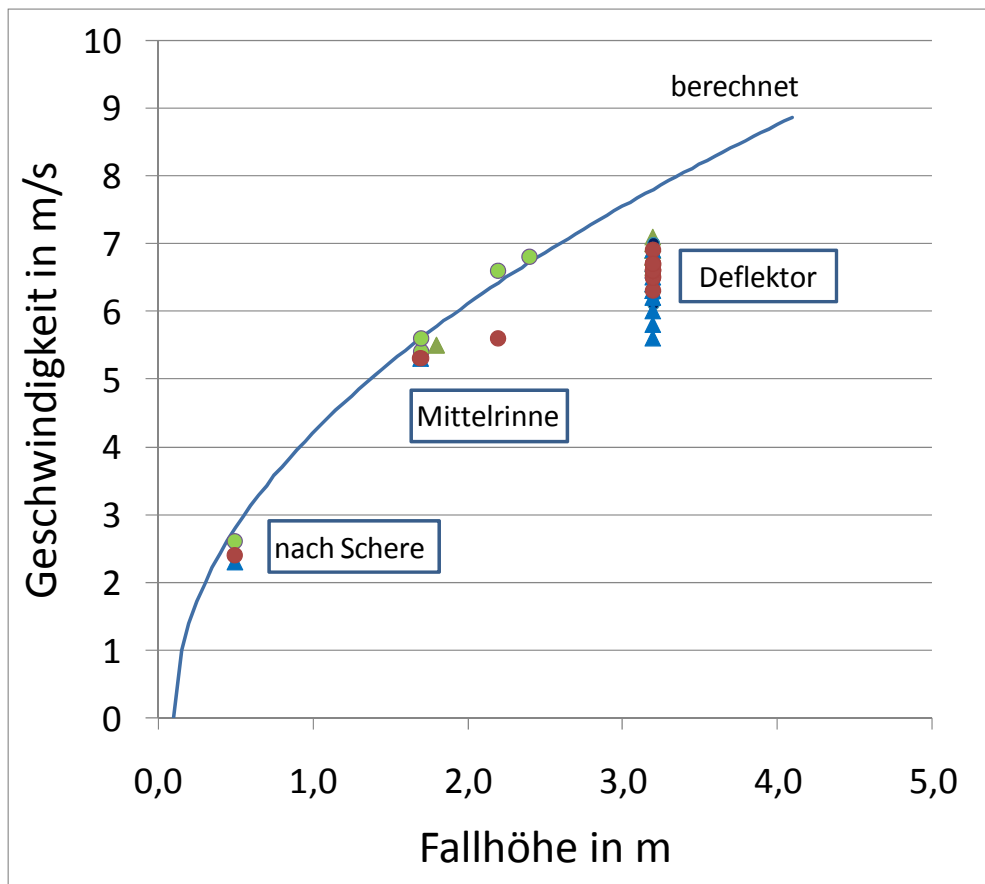


Bild 4: Aus der Fallhöhe berechnete und mit dem Speedgob gemessene Geschwindigkeiten.

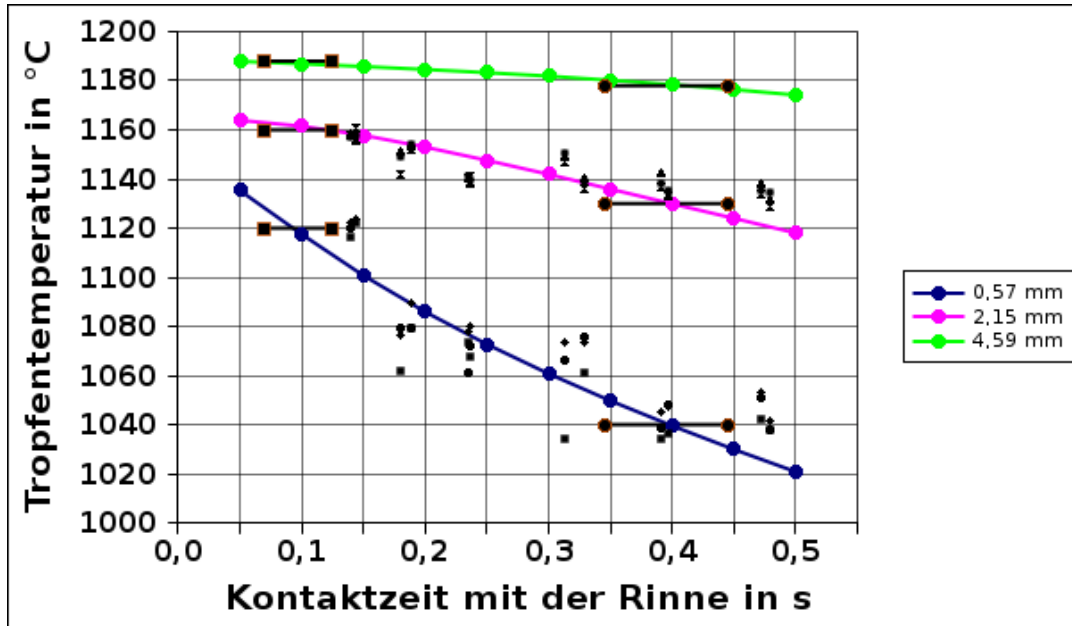


Bild 5: Tropfentemperatur in Abhängigkeit von der Kontaktzeit mit der Mittelrinne.

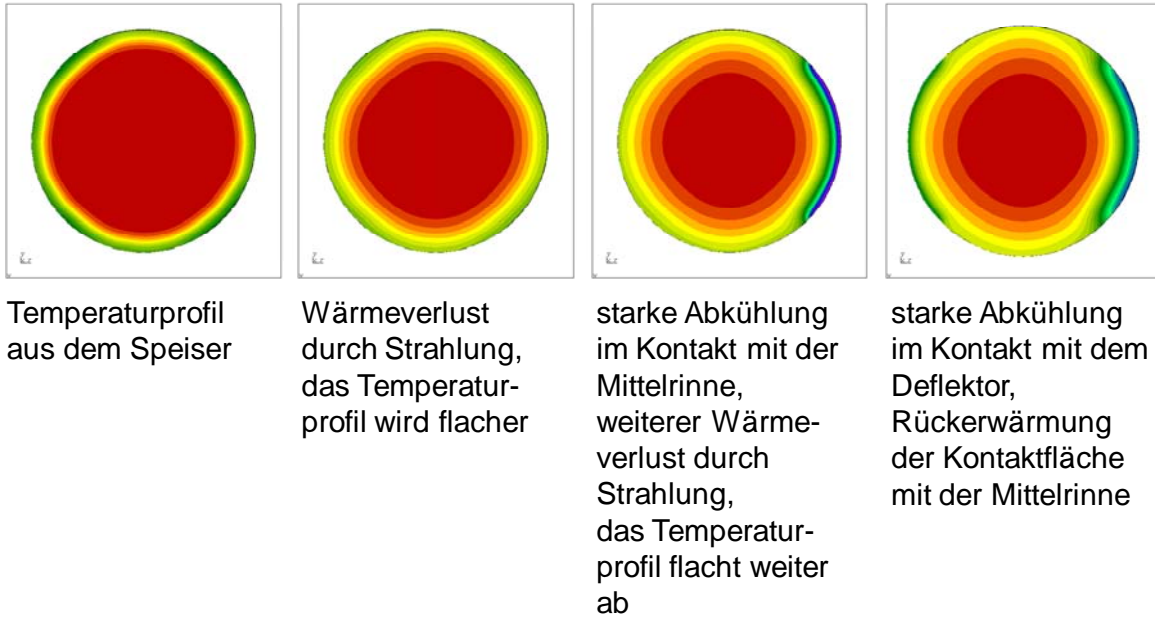


Bild 6: Radiale Temperaturverteilung zu verschiedenen Zeitpunkten.



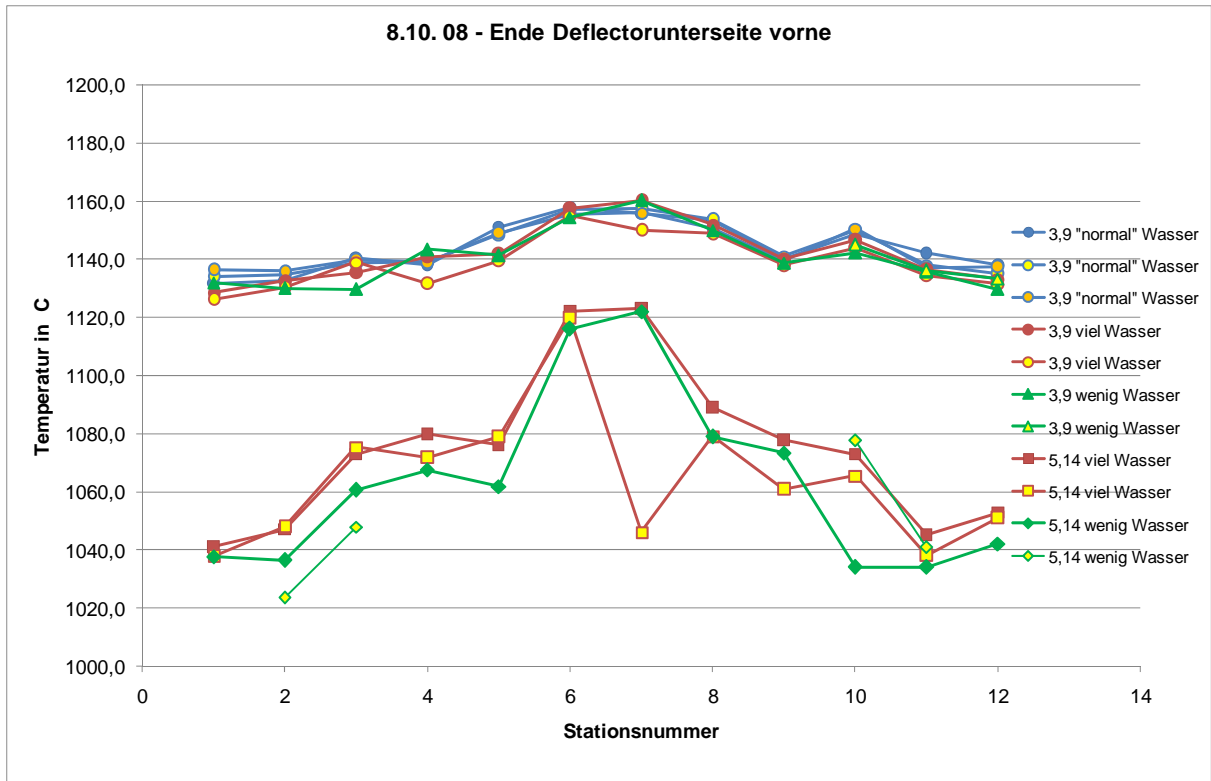


Bild 7: Temperaturen bei unterschiedlicher Einstellung der Scoop-Besprühung.

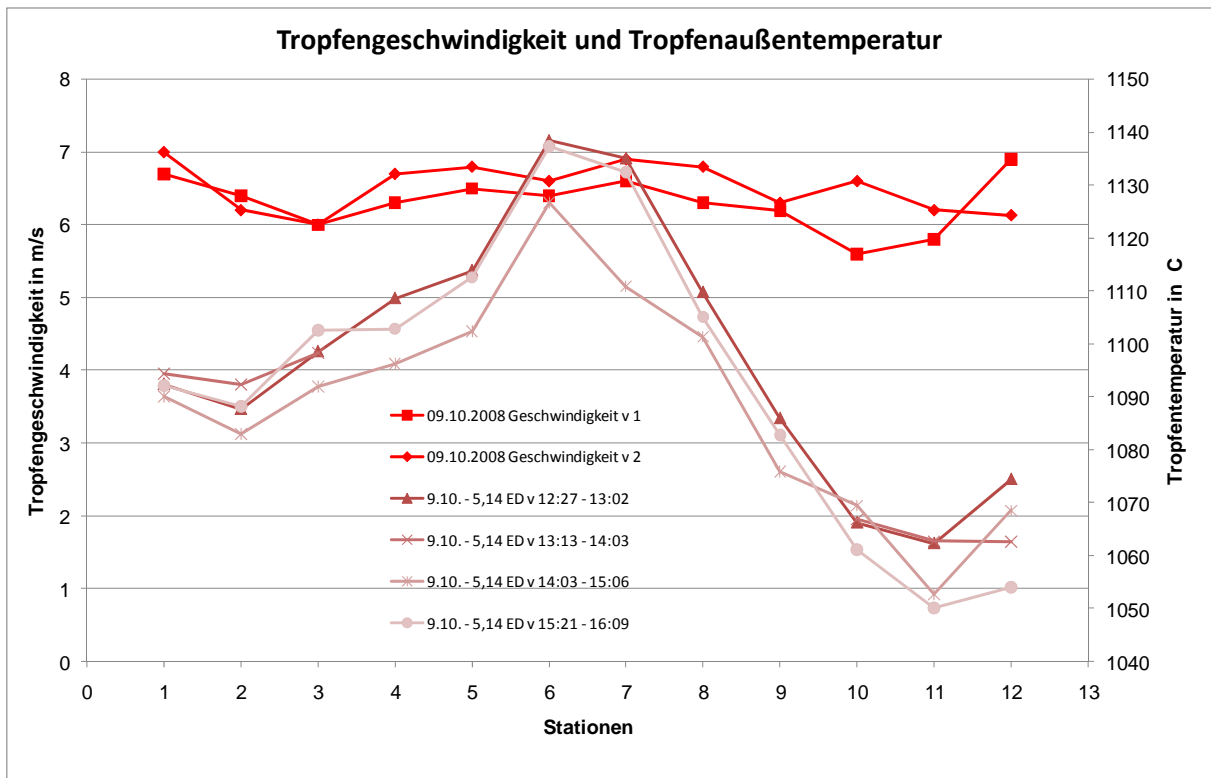


Bild 8: Temperaturen nach Lastwechsel.