

Wärmetechnische Untersuchungen an Formgebungsmaschinen der Hohlglasindustrie

G. Bergmann, H. Müller-Simon,
Hüttentechnische Vereinigung der deutschen Glasindustrie e. V., Offenbach

1. Einleitung

Ein entscheidender Schritt in der Glasherstellung ist die Formung des Produkts in den Formgebungsmaschinen. Dieser Schritt hat weitreichende Auswirkungen auf die Qualität, insbesondere die Festigkeit der hergestellten Artikel. Die Formgebung stellt im Prinzip eine Kombination aus Formung und kontrollierter Abkühlung dar, was sich in Betrachtungen der Formgebungsmaschinen als Wärmetauscher auch in der Literatur widerspiegelt [1]. Der Wärmeinhalt des Glaspostens und das wärmetechnische Verhalten der Formgebungsmaschine sind wichtige Merkmale, da

- zu geringe Temperaturen das viskoelastische Verhalten so ungünstig beeinflussen können, dass Heißrisse entstehen,
- zu hohe Temperaturen zum Kleben des Glaspostens am Formmaterial führen können und
- erzeugte Temperaturinhomogenitäten zu variierenden Glasdicken führen, wodurch sich das Gewicht bei gleicher Festigkeit unnötig erhöht.

All diese Gründe haben dazu geführt, dass sich in den vergangenen Jahren mehrere Arbeiten mit dem thermischen Verhalten von Formgebungsmaschinen befasst haben. Besonders interessant ist hierbei der Ansatz einer Wärmebilanzierung [2, 3], der bei der HVG mit einem eigenfinanzierten Projekt aufgegriffen wurde. Im Rahmen dieses Projektes wurden bisher neben eigenen Messungen zwei Diplomarbeiten [4, 5] durchgeführt. Aus den bisherigen Messergebnissen lassen sich interessante Zusammenhänge ableiten, über die im Folgenden berichtet werden soll.

2. Messung des Wärmeinhaltes

2.1 Kalorimeter-Messungen

Im Rahmen der ersten Diplomarbeit [4] wurden die Energieinhalte der Tropfen an den einzelnen Stationen vor dem Einfall in die Vorform kalorimetrisch untersucht. Hierzu wurde ein Schwenkkalorimeter verwendet. Vor Beginn jedes Versuches wurde dieses mit ca. 10 kg Wasser befüllt und bis zum Temperatenausgleich geschwenkt. Im Anschluss wurde der sich im Inneren befindende Lochblecheinsatzkorb entnommen, ein Tropfen aufgefangen, der Korb zügig wieder in das Kalorimeter eingehängt und dieses erneut bis zum Temperatenausgleich geschwenkt. Die Differenz der Temperaturen vor und nach dem Einbringen des Glaspostens ist ein Maß für die im Tropfen enthaltene Wärmemenge. Aus der Kalorimeterbilanz wurde auf den Energieinhalt der Tropfen zurückgerechnet. Damit ergaben sich die in Bild 1 dargestellten Verläufe entlang der Maschinenlängsachse.

2.2 Pyrometrische Messungen

Eine anschließende Diplomarbeit [5] untersuchte dieses Erscheinungsbild pyrometrisch. Qualitativ konnte die Abhängigkeit in Bild 1 bestätigt werden. Direkte quantitative Vergleiche waren nicht möglich, da es sich um verschiedene Produkte handelte. Die pyrometrischen Untersuchungen wurden auch auf das Kübel ausgedehnt. Die Temperaturen der Kübel wurden unmittelbar nach dem Öffnen der Vorform und nach dem Schwenken zur Fertigform bestimmt. Dabei zeigte sich der in Bild 2 dargestellte Sachverhalt. Die Ausprägung des Temperaturprofils ändert sich unter dem Einfluss der Formgebung. Unmittelbar nach der Kübelformung sind die Temperaturunterschiede zwischen den Glasposten an den verschiedenen Stationen am deutlichsten ausgeprägt (Bild 2 mitte), der charakteristische Verlauf vor dem Einfall in die Vorform ist nicht wieder zu finden. Nach der Rückwärmung des Kübels während des Umschwenkens ist eine Vergleichmäßigung des Temperaturprofils zu erkennen, es ähnelt wieder stärker dem Profil vor dem Einfall der Tropfen in die Vorform.

Die Messung des Tropfens vor dem Einfall in die Vorform spiegelt im Wesentlichen den Einfluss des Wärmehaltes wider. Die Messung der Kübeltemperatur unmittelbar nach dem Öffnen der Vorform zeigt ein deutlich anderes Bild. In dieser Messung wird der Einfluss des Wärmeübertragungsprozesses bei der Formgebung besonders deutlich. Je nach thermischem Zustand der Vorformen wird insbesondere der Oberfläche des Glaspostens eine Temperatur aufgeprägt, die nicht repräsentativ für den Gesamtenergieinhalt ist. Erst die Messung des Kübels vor dem Schließen der Fertigform lässt wieder Aussagen zur Gesamtwärmemenge zu, da hier durch Rückwärmung aus dem inneren des Glasvolumens eine Vergleichmäßigung des Temperaturprofils über der Wandstärke möglich war. Mit dicker werdender Wandstärke werden die Differenz zwischen Oberflächentemperatur und Volumentemperatur und somit der Fehler der Wärmemengenberechnung aus der pyrometrisch bestimmten Temperatur größer.

3. Einfluss der Tropfenlaufzeit

Der vermutlich entscheidende Faktor bezüglich des Temperaturprofils der Tropfen vor dem Einfall in die Vorform ist die Laufzeit der Tropfen entlang der Rinnen. Der durch pyrometrische Temperaturmessung bestimmte Energieverlust der Tropfen zwischen dem Scoop und dem Ende der Deflektorrinnen wurde nach Gleichung 1 ermittelt.

$$\Delta Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

Er beträgt zwischen 4,3 kJ an den inneren Stationen und 8,6 kJ an den äußeren Stationen. Unter Annahme einer zylindrischen Tropfenform und unter Verwendung von Gleichung 2 beträgt der mittlere Energieverlust durch Strahlung unter Berücksichtigung der Laufzeiten zwischen 0,8 kJ an den inneren Stationen und ca. 1 kJ an den äußeren Stationen.

$$\frac{\Delta Q_s}{t_{\text{Laufzeit}}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot A \quad (2)$$

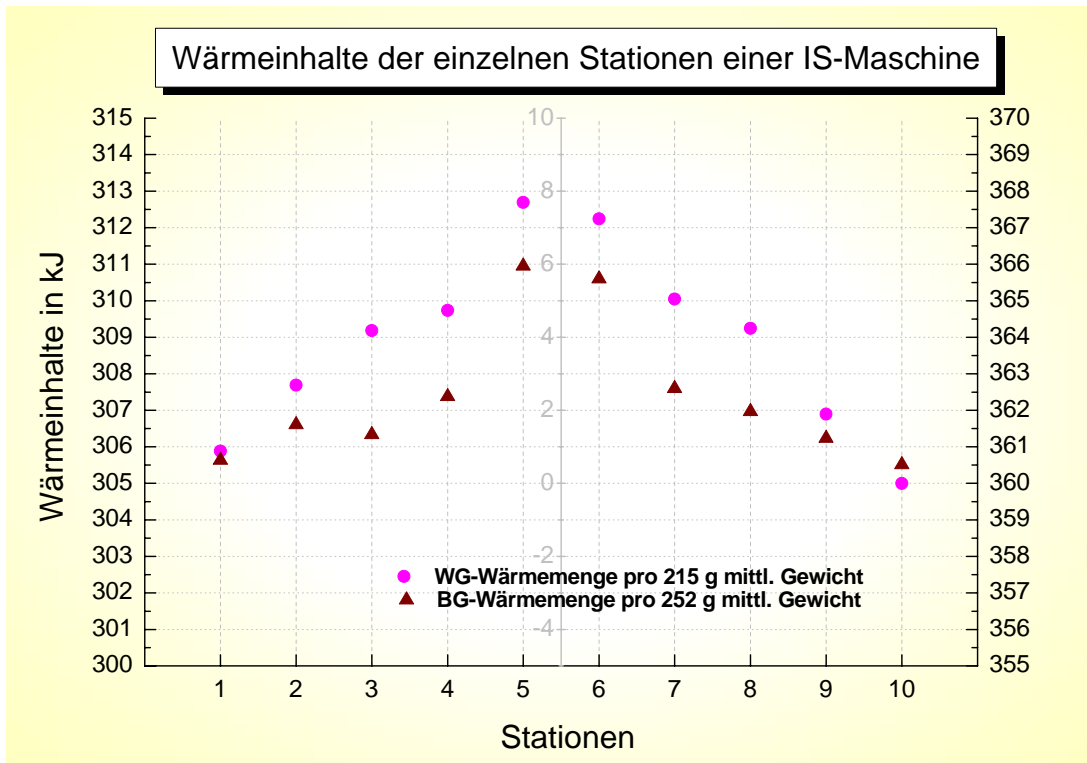


Bild 1: Wärmemengenverläufe entlang der Maschinenlängsachse bei Weißglas (WG) und Braunglas (BG).

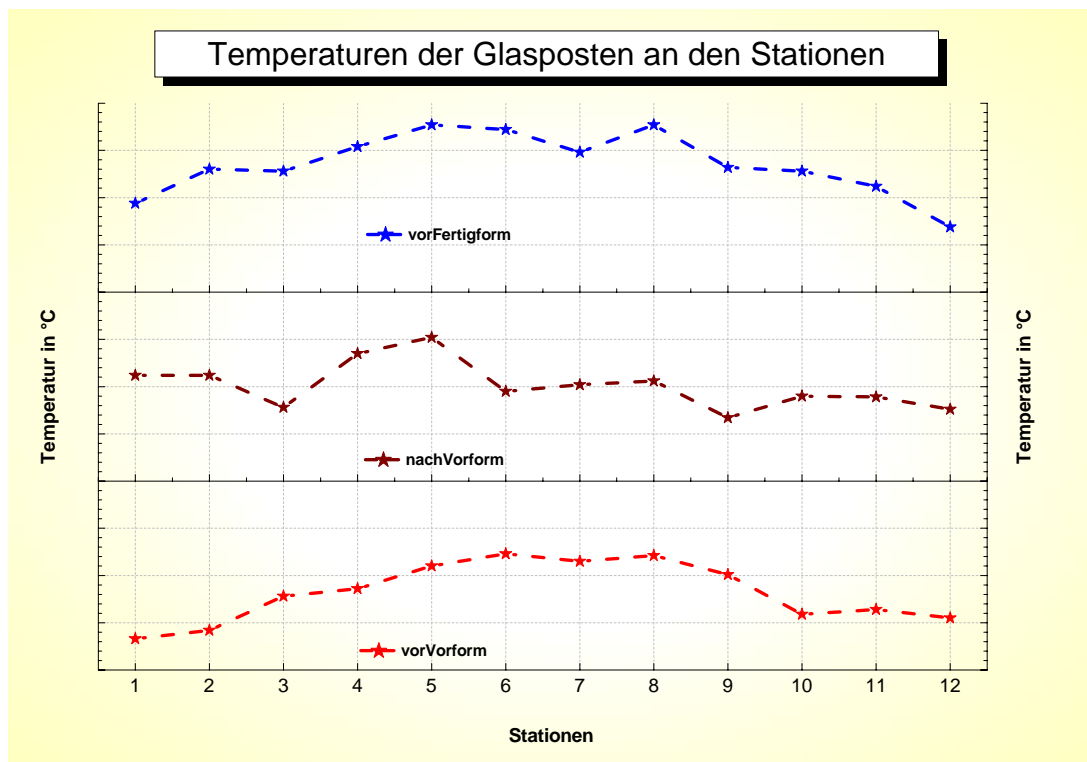


Bild 2: Temperaturprofile des Glaspostens in der IS-Maschine.

Station		1	2	3	4	5	6
Laufzeit	s	1,008	0,9767	0,9407	0,9097	0,8765	0,8496
Rinnenlänge	m	3,41	3,1	2,82	2,58	2,4	2,3
gemessener Gesamtwärmeverlust	J	8627	8248	6494	6162	4977	4361
berechneter Strahlungsverlust	J	1030	999	968	938	907	882
berechneter Kontaktverlust	J	7597	7249	5526	5224	4070	3479
berechneter Wärmeübergangskoeffizienten	W/m ² K	734	730	732	732	725	720

Tabelle 1: wärmetechnische Daten.

Die Differenz zwischen dem pyrometrisch bestimmten Energieverlust und der rechnerischen Abschätzung des Verlusts durch Strahlung muss durch den Wärmeübergang durch Kontakt an das Rinnensystem abgeführt worden sein. Die aus der Pressformgebung bekannten Wärmeübergangskoeffizienten zwischen 2 und 14 kW/m²K ergeben einen deutlich höheren Wärmeentzug als gemessen. Aus diesem Grund wurde umgekehrt versucht, Wärmeübergangskoeffizienten für das Gleiten im Rinnensystem nach Gleichung 3 abzuschätzen.

$$\frac{\Delta Q_K}{t_{\text{Laufzeit}}} = \alpha \cdot \Delta T \cdot A \quad (3)$$

Das Ergebnis der Rechnung sind nahezu gleiche Werte für die inneren und äußeren Rinnen im Bereich um 0,7 kW/m²K (Tabelle 1). Die hier berechneten Wärmeübergangskoeffizienten betragen etwa ein viertel des kleinsten, aus der Pressformgebung bekannten, Wertes. Es liegt beim Gleiten in der Rinne kein inniger Kontakt vor, sondern eher eine Isolationsschicht aus Wasser- und/oder Öldämpfen. Somit ist die Größenordnung der ermittelten Werte realistisch. Das Ergebnis der nahezu identischen Wärmeübergangskoeffizienten legt den Schluss nahe, dass die Hauptursache des Temperaturprofils tatsächlich die Laufzeitunterschiede sind. Inwieweit ein zusätzlicher Beitrag durch die Längen-Gewichts-Verhältnisse der Rinnen entsteht, konnte noch nicht endgültig geklärt werden. Eine Korrelation konnte bisher noch nicht endgültig bewiesen werden. Dazu sind Versuche mit Rinnenmaterial nötig, die verschiedene Gewichte bei sonst gleicher Länge und sonstigen identischen Werkstoffcharakteristika ermöglichen.

Weiterhin wurden in [5] Tropfenlaufzeiten und Tropfengeschwindigkeiten mit einer Hochgeschwindigkeitskamera und einem Speed-Gop ermittelt. In Tabelle 2 sind die mittleren, nach Gleichung 4 berechneten, und die gemessenen Endgeschwindigkeiten dargestellt.

Station		1	2	3	4	5	6
Laufzeit	s	1,008	0,9767	0,9407	0,9097	0,8765	0,8496
Rinnenlänge	m	3,41	3,1	2,82	2,58	2,4	2,3
gem. Geschwindigkeit am Deflectorende	m/s	6,242	6,39	5,786	5,712	6,34	6,704
berechnete mittlere Geschwindigkeit	m/s	3,383	3,174	2,998	2,836	2,738	2,707
Tropfenlängen	m	0,2598	0,2617	0,2540	0,2313	0,2266	0,2370

Tabelle 2: Tropfengeschwindigkeiten und Tropfenlängen.

$$v = \frac{s_{\text{Gleitlänge}}}{t_{\text{Laufzeit}}} \quad (4)$$

Diese Daten erscheinen im Vergleich zur maximal erzielbaren Geschwindigkeit im freien Fall (ca. 7,3 m/s maximal und 3,6 m/s im Mittel) sinnvoll. Die Differenz zur maximal möglichen Geschwindigkeit entsteht durch Reibungsverluste in der Mittelrinne, vor allem aber durch das Abbremsen des Tropfens beim Anschlagen gegen die Deflektorrinne. Hier spielen sowohl die Endgeschwindigkeit in der Mittelrinne, als auch die Krümmung des Deflektors eine Rolle. Eine Quantifizierung der Einflüsse ist in zukünftigen Arbeiten geplant.

4. Temperaturänderungen nach der Formgebung

Weitere pyrometrische Untersuchungen wurden zum Abkühlverhalten fertiger Flaschen durchgeführt. Die Messungen erfolgten während des Anblasens des Bodens mit Luft über der Absetzplatte. Hierzu wurde über einen Zeitraum von ca. 4 Sekunden die Temperatur von jeweils ca. 17 Flaschen pro Station am Flaschenboden ermittelt. Die große Anzahl der Einzelmessungen sichert die Reproduzierbarkeit. Die Ergebnisse sind in Bild 3 dargestellt.

Die Fertigformseite der betrachteten Maschine liegt gegenüber der Fertigformseite der nächsten Maschine, die Stationen 1 und 3 befinden sich an der betrachteten Maschine in Richtung des Kühlbandes. Dies erklärt die höhere Anfangs- und Endtemperatur der Stationen 1 und 3 gegenüber den Stationen 10 und 12. Die Flaschen der mittleren Stationen sind erwartungsgemäß zu Beginn der Versuche am wärmsten. Es ist sehr deutlich zu erkennen, dass die inneren, zunächst heißeren Stationen zu Beginn ein völlig anderes Abkühlverhalten haben als die äußeren Stationen. Die Ursache kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht mehr genau benannt werden. Alle Flaschen werden von unten mit Druckluft angeblasen. Die dadurch erzeugte Abkühlung sollte bei allen Stationen in etwa gleich sein, was sich auch in dem gleichen Abkühlverhalten ab ca. 500 ms zeigt. Eine denkbare Erklärung für das zunächst schnellere Abkühlen an den Stationen 6 und 7 kann das unkontrollierte Anblasen mit Falschluff sein, dessen Ursache jedoch im Nachhinein nicht mehr feststellbar war. Der nahezu lineare Temperaturverlauf an den Stationen 1, 3, 10 und 12 deutet auf einen gleichmäßigen Energieentzug durch Strahlung und Konvektion hin. Hier zeigt sich deutlich, dass pyrometrische Untersuchungen und kalorimetrische Untersu-

chungen nicht in jedem Fall frei austauschbar sind. Würde man im Folgenden diese Flaschen kalorimetrisch untersuchen, würden sich große Fehler durch falsche Zuordnung des Wärmeentzugs zum Produktionsschritt ergeben. Der mittlere Temperaturunterschied zwischen den Stationen 1, 3, 10, 12 und 6, 7 beträgt nach 2 Sekunden ca. 63 K, kurz vor dem Absetzen ca. 60 K. Dies würde bei der kalorimetrischen Messung einem Fehler der Temperaturzuordnung des Prozesses in der Fertigform von etwa 7 % entsprechen.

Weiterhin wurden kalorimetrische Messungen an der Fertigformseite durchgeführt (Bild 4). Sie hatten jedoch zunächst orientierenden Charakter bezüglich der Einsetzbarkeit des Verfahrens. Hier wurde das Kübel nach dem Überschwenken vor dem Schließen der Fertigform aufgegriffen sowie fertig ausgeblasene Flaschen vor dem Absetzen auf das Plate untersucht. Bei beiden Versuchen musste mit Zangen gearbeitet werden, da die Platzverhältnisse keinen Einsatz eines bisher üblichen Fangkorbes erlauben.

Erwartungsgemäß sind die größten Fehler bei der Temperaturbestimmung des Kübels aufgetreten, die Temperaturbestimmung der Flaschen war deutlich genauer, da hier an der Mündung, der ohnehin kältesten Stelle, der Zugriff erfolgte. Weitere Untersuchungen nach einem teilweisen Umbau des Kalorimeters sind geplant, da nur mit Hilfe kalorimetrischer Methoden der Gesamtenergieinhalt ermittelt werden kann.

5. Ausblick

In zukünftigen Arbeiten sollen die Einflüsse des Rinnensystems auf den Tropfen näher untersucht werden. Dies bedeutet sowohl die Untersuchung geometrischer Veränderungen am Rinnensystem, die nähere Betrachtung physikalischer Gegebenheiten als auch die Analyse materialspezifischer Veränderungen. Es werden weitere physikalische Maschinenkennwerte ermittelt. Für die Ermittlung von Temperaturen und Temperaturverteilungen wird künftig neben den kalorimetrischen und pyrometrischen Messungen eine Thermokamera eingesetzt werden.

6. Literatur

- [1] Schumacher, R.: Wärmetransport bei der Formgebung. In: HVG-Fortbildungskurs 2002: Wärmetransportprozesse bei der Herstellung und Formgebung von Glas, Offenbach (2002).
- [2] Dastis, H.: Wärmebilanzierung an IS-Maschinen. Diplomarbeit an der TU Bergakademie Freiberg (2002).
- [3] Dastis, H.; Zimmermann, H.: Wärmebilanzierung an IS-Maschinen. HVG-Mitteilung 2054 (2003)
- [4] Görlich: Wärmebilanzierung an IS-Maschinen. Diplomarbeit an der Gerhard Mercator-Universität Duisburg (2004)
- [5] Burkhardt, O.: Wärmebilanzierung an IS-Maschinen. Diplomarbeit an der Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg (2005).

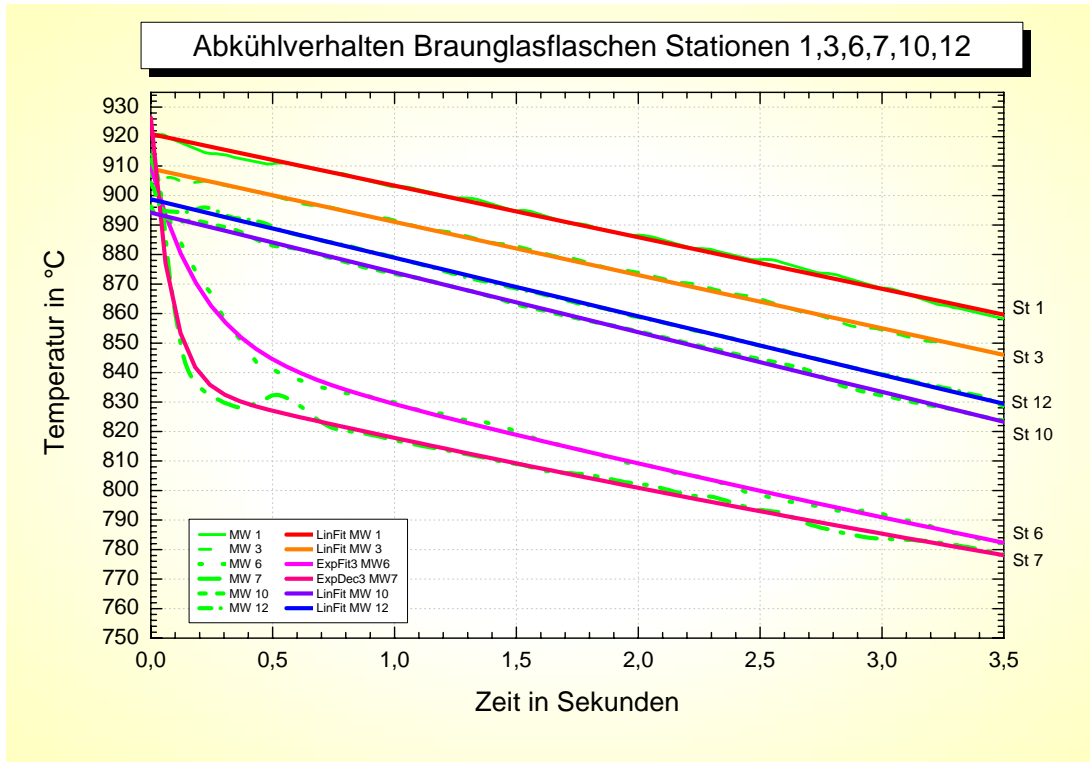


Bild 3: Abkühlverhalten von Braunglasflaschen ausgewählter Stationen.

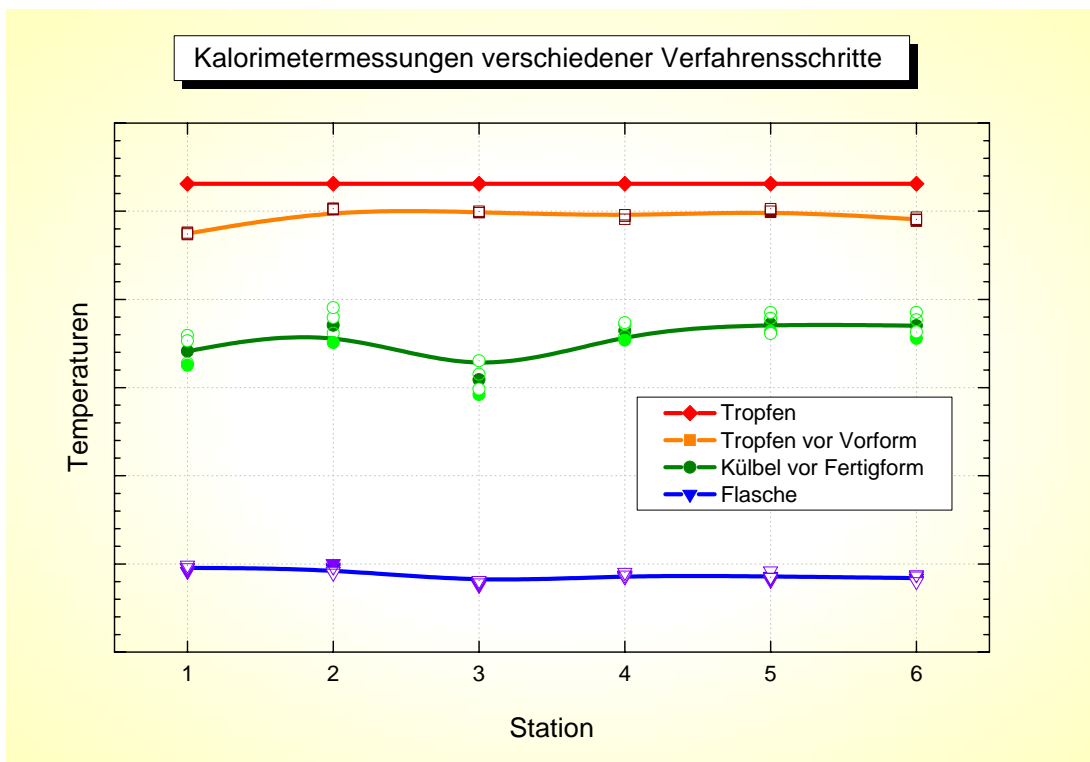


Bild 4: kalorimetrische Orientierungsversuche.

