

## Wärmebilanzierung an IS-Maschinen

H. Dastis, Inst. f. Silikattechn., TU Bergakademie Freiberg  
H. Zimmermann, Silitec Ing. Ges. f. Silicattechnik mbH, Großschirma

### 1 Einleitung

In der vorliegenden Arbeit werden für zwei IS-Maschinen Wärmebilanzen aufgestellt. Dabei bildet die gesamte Maschine den Bilanzraum, in dem ein Massestrom heißen Glases von einem Volumenstrom kalter Luft gekühlt wird. Die Temperatur des Glaspostens bei Eingang in die Maschine wird pyrometrisch und kalorimetrisch erfasst. Die Temperatur des fertigen Artikels wird ebenfalls mit Hilfe eines eigens für diesen Zweck entwickelten Kalorimeters bestimmt. Zur Charakterisierung des Luftstromes wird dessen Strömungsprofil und Temperatur in der Zuleitung erfasst. Anhand dieser Ergebnisse werden zwei verschiedene Kühlungssysteme (Vertiflow- & Radialkühlung) über ihre Wärmebilanzen verglichen und bewertet.

Es zeigt sich, dass bei Einsatz von Vertiflow geringere Luftmengen nötig sind. Das Verfahren könnte durch eine Verbesserung des Wärmeleitungsvermögens der Formen optimiert werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit einer Senkung der Energiekosten bei der Kühllufterzeugung über eine Anpassung des geförderten Kühlluftstromes an die jeweils wirklich benötigte Luftmenge. Eine Drehzahlregelung des Lüfters über einen Frequenzumrichter erscheint dabei empfehlenswert. Ein weiterer Vorteil der Vertiflowkühlung ist die Verringerung der Temperaturunterschiede im Nahtbereich der Formen.

Seit Beginn der vollautomatischen maschinellen Fertigung von Behälterglas wurden ständig Maschinentypen, Verfahren, Steuerungen und Speisertechniken weiterentwickelt, wodurch immer höhere spezifische Produktionsgeschwindigkeiten möglich wurden. Für die Fertigungsgeschwindigkeit sowie die Qualität der Produkte blieb dabei aber die Formenkühlung immer einer der begrenzenden Faktoren.

Die Konkurrenz durch PET-Behälter, und damit das Streben nach immer leichtgewichtigeren Behältern, erzwingt bei der Formgebung eine immer gezieltere Glasverteilung, welche wiederum stark von der Art und Weise der Formenkühlung abhängt.

Um die Kühlung der Formen optimieren zu können, ist es unerlässlich, die Vorgänge beim Wärmeübergang zu kennen und beschreiben zu können. Für bestimmte Aspekte spielt der Wärmeübergang zwischen Glasschmelze und Form bzw. Pegel eine dominante Rolle und ist daher Gegenstand verschiedener aktueller Forschungsprojekte, die u.a. an der TU Freiberg durchgeführt werden.

Die in Auszügen vorliegende Diplomarbeit betrachtet zur Ergänzung dazu den Prozess ganzheitlich als Bilanzraum, um mit aus der Praxis gewonnenen Daten entsprechende Schlüsse ziehen zu können. Dabei mussten eine Vielzahl von Näherungen und Abschätzungen getroffen werden, was nur zum Teil eine Folge der messtechnisch schwer zugänglichen und komplexen Technologie des gesamten Formgebungsprozesses war. Der andere Teil besteht aus einem Mangel an vermeintlich simplen Basisdaten, wie zum Beispiel einer temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität. Hier besteht auch im Hinblick auf Modellrechnungen ein erheblicher Nachholbedarf.

In der IS-Maschine hat zum einen der Formgebungsprozess über die bekannten Blas-Blas- oder Press-Blas- Verfahren zu erfolgen und zum anderen muss in den entsprechenden Prozessstufen dem Glasposten genügend Energie entzogen werden. Verformungs- und Wärmeentzugsgeschwindigkeit müssen aufeinander abgestimmt sein, so dass die Formgebung möglichst schnell erfolgt und gerade dann beendet ist, wenn die Viskosität so große Werte annimmt, dass sich das Erzeugnis unter seinem Eigengewicht nicht mehr unzulässig stark deformiert. Infolge des starken Einflusses, den die Temperatur auf die Viskosität ausübt, wirkt der Abkühlvorgang der Verformbarkeit entgegen, was sich in der dynamischen Verarbeitbarkeit widerspiegelt, die sich aus den Eigenschaften der Schmelze in Kombination mit der gesamten Prozesstechnik ergibt. Eine Beschleunigung der Formgebung und / oder des Wärmeentzuges (z.B. Kühlung der Formen) ist also nur in den Grenzen möglich, die durch die dynamische Verarbeitbarkeit festgelegt sind.

## 2 Messgeräte

Zur schnellen und relativ einfachen Bestimmung der Formtemperaturen wurden dafür geeignete Pyrometer verwendet. Für die Beurteilung der Wärmebilanz einer Produktionsmaschine von Hohlglasgefäßen ist die Kenntnis der Wärmeverhältnisse während der einzelnen Phasen des Herstellungsprozesses von wesentlicher Bedeutung. Die Bestimmung des Wärmeinhaltes und der mittleren Temperatur stellt dabei ein messtechnisch sehr schwieriges Problem dar. Pyrometrische Messungen an heißen Glasposten geben dabei nur Aufschluss über die integrale Temperatur des Messfeldes und sind von der Dicke und vom Absorptionskoeffizienten des jeweiligen Glases abhängig.

Es ist bekannt, dass bei der Herstellung von Hohlglasartikeln die Temperaturen über die Fläche und Tiefe des Formlings stark variieren. Beim Abstellen des heißen Artikels auf das Kühlband hat nur die Oberfläche des Glases eine so geringe Temperatur, dass die Viskosität für eine hinreichende Formstabilität ausreichend hoch ist. Das Gleiche gilt, wenn auch auf einem anderen Niveau, beim Umsetzen des Kübels von der Vor- in die Fertigform. Dabei wird der Mündungsbereich des Kübels schon so stark abgekühlt, dass er schon bei diesem Prozessschritt ausreichend stabil ist. Eine lokale Temperaturmessung wäre demnach auch nur für ganz bestimmte Interpretationen tauglich, gewiss aber nicht für eine bilanzielle Betrachtung. Daher wurde auf die Kalorimetrie zurückgegriffen.

### 2.1 Kalorimetrische Bestimmung der Glastemperatur

Mit Hilfe eines Kalorimeters kann der Energieinhalt eines kompletten Körpers, und damit seine mittlere Temperatur bestimmt werden. Die Arbeiten von Strack [1 ] und Unger [2 ] lieferten wichtige Hinweise für die Konstruktion und den Aufbau eines Kalorimeters für den hier vorliegenden Anwendungszweck. Folgende Punkte galt es zu beachten:

- Um Verluste durch Verdampfen und Verspritzen von Wasser zu vermeiden, darf die Flasche bzw. das Kübel nicht direkt ins Wasser getaucht werden, schon wegen der hohen Verdampfungsenthalpie des Wassers.
- Die Temperatur der Flasche muss auf mindestens  $\pm 5^\circ\text{C}$  genau bestimmt werden können, um eine vergleichende Interpretation zu gestatten.

- Eine gute Durchmischung des Wasserbades während der Versuchsphase muss sichergestellt werden.
- Das Wasser soll im Versuch sprunghaft seine Temperatur ändern, d.h. nach kurzer Zeit muss sich die Mischungstemperatur eingestellt haben. ⇒ Verringerung von Umgebungseinflüssen.
- Das Kalorimeter soll für verschiedene Behältergrößen anwendbar sein.
- Das Messverfahren muss soweit entwickelt sein, dass es mit geringen Personalaufwand durchführbar ist.
- Trotz der oben aufgeführten Punkte, muss die Messvorrichtung noch so handlich sein, dass ohne Schwierigkeiten und ohne Behinderung des Produktionsablaufs direkt an der Maschine gemessen werden kann.

In Anlehnung an das von Unger verwendete Kalorimeter und unter Beachtung dieser Anforderungen wurde ein Schwenkkalorimeter gebaut. Zur Messung der Temperatur des Wassers wurde in die Mittelachse des Kalorimeters ein Widerstandsthermometer pt100 integriert, ein entsprechender Messumformer und ein Speicher-/ Ausgabegerät angebracht. Jede Sekunde wird ein Messwert aufgezeichnet.

## **2.2 Charakterisierung der Kühlluft**

Zur Charakterisierung der zugeführten Kühlluftströme wurde ein Flügelradanemometer verwendet. Mit diesem ist es möglich, über die Eintauchtiefe ein Geschwindigkeitsprofil der Strömung aufzunehmen. Gleichzeitig kann mit dem Messgerät die Temperatur der Kühlluft im Kanal bestimmt werden. Der Druck wurde, soweit möglich, über an der IS-Maschine vorhandene Manometer erfasst. Um das Geschwindigkeitsprofil der Kühlluft und daraus den Volumenstrom zu bestimmen, wurden in der Zuleitung mehrere Bohrungen gesetzt. Dabei wurde sowohl die Hauptleitung erfasst als auch die Zuleitungen in die einzelnen Stationen sowie die Abgänge zur Bandkühlung. Das Flügelradanemometer wurde über verschiedene Tiefen in die Strömung getaucht und der Geschwindigkeitswert der Strömung an der jeweiligen Position bestimmt. Trägt man die Geschwindigkeit über der Eintauchtiefe auf, so erhält man ein Geschwindigkeitsprofil. Aus diesem Profil kann über Integration eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden.

## **3 Verwendete Berechnungsmodelle**

Es kamen verschiedene Modelle zur Berechnung des Wärmeüberganges von der Form an die Luft bzw. in die Umgebung zum Einsatz. Die Modelle und deren Gleichungen, die dabei Anwendung finden sind dem VDI-Wärmeatlas [3] entnommen und sollen hier nur aufgezählt werden:

- Wärmeübergang durch Mischkonvektion

Die Überlagerung von freier und erzwungener Konvektion bezeichnet man als Mischkonvektion. Die freie Konvektion entsteht aufgrund von Dichteunterschieden, welche durch Temperaturunterschiede hervorgerufen werden. Von erzwungener Konvektion spricht man, wenn dem Fluidstrom eine Geschwin-

digkeit aufgeprägt wird. Beide Konvektionsformen tragen zum Wärmeübergang bei. Überwiegt eine Konvektionsform, so kann der Wärmeübergang durch deren Wärmeübergangskoeffizienten berechnet werden. Im Übergangsbereich darf jedoch keine der beiden Komponenten vernachlässigt werden.

- Wärmeübergang bei Querströmung um Rohre

Dieses Modell diente zur Abschätzung des Wärmeüberganges bei Radialkühlung.

- Wärmeübergang in Bohrungen

Mit diesem Modell lässt sich nach Mc Adams [4] der Wärmeübergang bei der Vertiflowkühlung beschreiben.

- Wärmeübertragung durch Strahlung

#### **4 Beschreibung der untersuchten Kühlsysteme**

Es wurden zwei unterschiedliche Kühlsysteme bilanziert. Zum einen eine IS-Maschine im Werk Bad Wurzach, zum anderen eine IS-Maschine im Werk Essen. Beide Werke gehören zur Saint-Gobain Oberland AG.

##### **4.1 Bad Wurzach**

Die untersuchte IS-Maschine ist eine 6 Zoll - 12 Stationen - Doppeltropfen – Maschine, die im Messzeitraum unter Braunglas lief. Der Artikel, mit einem Tropfengewicht knapp 400 g, wurde im Blas-Blas-Verfahren (BB) hergestellt. Auf der Vorformseite wurde die Radialkühlung, auf der Fertigformseite Radialkühlung in Kombination mit Vertiflow eingesetzt. Der Luftstrom der Kühlluft für die Radialkühlung beider Seiten wird über den selben Lüfter erzeugt. Eine Aufteilung auf die Vorform- und Fertigformseite erfolgt erst in der Maschine. Eine Unterbrechung der Kühlluftzufuhr über eine Kellerklappe wird nicht vorgenommen. Vom Hauptkanal der Luftzuführung für die Radialkühlung gehen nur die Abzweigungen zu den Stationen weg.

Der Vertiflow Kühlluftstrom wird in einem gesonderten Lüfter erzeugt und separat der Maschine zugeführt. Dieser Luftstrom durchläuft die Stationsbox, den ebenso mit Bohrungen versehenen Fertigformboden und dann die (Kanal-) Bohrungen der Form. Da zum Zeitpunkt der geöffneten Fertigform (Be-, Entladen der Form) die Bohrungen des Fertigformbodens und die der Form nicht übereinander liegen, wird dieser Luftstrom mittels der Kellerklappe unterbrochen. Abgesehen von den Abzweigungen für die einzelnen Stationen sind am Vertiflow-Hauptkanal noch zwei Abzweigungen für die Bandkühlung und eine für die Seitenkühlung vorhanden.

##### **4.2 Essen**

Die IS-Maschine im Werk Essen ist ebenfalls eine 6 Zoll – Doppeltropfen – Maschine, nur mit dem Unterschied, dass diese mit 10 Stationen arbeitet. Der Behälter wird im Enghals-Press-Blas-Verfahren (EPB) hergestellt. Auf der Maschine wurden

im Messzeitraum braune Flaschen mit einem Tropfengewicht von gut 300 g hergestellt.

Auf der Vorform- sowie auf der Fertigformseite findet die Formenkühlung über Vertiflow statt. Dabei wird ein System verwendet, welches es gestattet, die Formenkühlung über den kompletten Maschinenzklus durchzuführen (360°-Kühlung). Auf der Fertigformseite wird zusätzlich die konventionelle Vertikalkühlung verwendet, sprich durch den Fertigformboden hindurch.

Aus der Forderung, die konventionelle Vertikalkühlung bei der Formbe- und Entladung zu unterbrechen, ergibt sich die Notwendigkeit zweier getrennter Luftströmungen, die idealerweise durch zwei Radiallüfter erzeugt werden. Einer davon versorgt ausschließlich die konventionelle Vertikalkühlung auf der Fertigformseite. Der andere liefert die Luft für die Bandkühlung (zwei Abzweigungen) und für die Vertiflowkühlung für die Fertigform- sowie Vorformseite. Die Aufteilung des Volumenstromes auf die beiden Seiten erfolgt erst in der Maschine.

## 5 Das Temperaturverlaufsbild

Zur Ermittlung der Bilanz eines Systems wurde wie folgt vorgegangen. Zuerst wurden die Kalorimeterdaten ausgewertet. Daraus ergibt sich für einen Glasposten ein Temperaturverlauf über die einzelnen Prozessschritte und analog dazu ein Wärmeinhaltsverlauf. Diese beiden Ergebnisse werden in einem Temperaturverlaufsbild dargestellt. Aus diesem Verlauf lässt sich entnehmen, welche Energiebeträge der Glasposten auf der Vor- sowie Fertigformseite abgibt. Über Anwendung der verschiedenen Modelle und Abschätzungen werden außerdem *die* Energiebeträge ermittelt, welche *nicht* über die Formenkühlung abgeführt werden. Dazu kommen noch die Energiebeträge, welche die Form durch Strahlung und freie Konvektion an die Umgebung überträgt. Aus der Differenz wird ein Restbetrag bestimmt, welcher durch die *aktive Formkühlung* abgeführt werden muss. Diese Ergebnisse werden in einem Maschinen-Energie-Bild dargestellt.

Danach wird die Kühlung der Form untersucht. Dazu wird die zugeführte Menge und Temperatur der Kühlluft aus den Messdaten bestimmt. Die Parameter der Luft nach der Kühlung werden, da sie messtechnisch schwer erfassbar sind, berechnet und abgeschätzt. Grundlage dazu ist, dass die im vorhergehenden Kapitel bestimmte, über die aktive Kühlung aus der Form abzuführende Energie von der Luft aufgenommen wird. Die Austrittsgeschwindigkeit ergibt sich aus den Strömungsmessungen und der Kontinuitätsgleichung. Über Modelle zum Wärmeübergang von der Form an das Kühlmedium Luft wird ein theoretischer Wärmestrom ermittelt. Die Ergebnisse beziehen sich, wenn nicht anders gekennzeichnet, auf das Verhalten eines Glaspostens einer Form in einem Zyklus.

Anhand der Bilanz für das System Essen soll die Vorgehensweise zur Erstellung des Temperaturverlaufsbildes und des Maschinen-Energie-Bildes exemplarisch dargestellt werden. Wie Eingangs erwähnt, wird die mittlere Temperatur des fertigen Artikels durch Messungen mit dem Kalorimeter bestimmt, das auch für die Ermittlung der Kübel- sowie der Tropfentemperatur zur Anwendung kam. Über ein Dreistufenthermoelement kurz vor dem Spout wurde die dortige Temperatur gemessen und als (theoretische) *Tropfentemperatur vor dem Schnitt* angenommen. Die Temperatur

beim Tropfenschnitt wurde mittels Pyrometer (Spektralbereich von 1,45 bis 1,8  $\mu\text{m}$ ;  $\epsilon = 0,96$ ) bestimmt.

Der Energieinhalt des Tropfens wurde wie folgt bestimmt: Der Tropfen wurde kurz nach dem Schnitt, vor der Scoop-Rinne mit einer Schaufel aufgefangen und in das Kalorimeter umgesetzt. Selbige Durchführung erfolgte am Ende der Rinnenzuführung, kurz vor Einfall des Tropfens in die Vorform. Aus den Werten dieser beiden Versuchsreihen wurde die Differenz gebildet. In beiden Versuchsreihen wurde die Überführungszeit und die Aufnahme mit der Schaufel soweit als möglich konstant gehalten. Daher konnte die Annahme getroffen werden, dass in diesen Messreihen etwa der gleiche Fehler (der gleiche Wärmeentzug) durch die Überführung ins Kalorimeter auftritt. Eine Überprüfung dieser Annahme konnte noch nicht durchgeführt werden.

Ergebnis war, dass der Glasposten von Tropfenschnitt bis in die Vorform integral  $40^\circ\text{C}$  verliert. Dieser Wert erscheint recht hoch, und bedarf in weiteren Arbeiten der Bestätigung, zumal eine Abschätzung des Strahlungswärmeverlustes während des Tropfenfalls bei einer Fallzeit von 1 Sekunde nur etwa 20% des „gemessenen“ Wärmeverlustes ergeben, also  $8^\circ\text{C}$  Abkühlung. Zusätzliche Wärmeverluste durch Verdampfung von Wasser aus Messerkühlung und Rinnenkühlung sowie durch den Wärmeübergang von Glaspunkten zur Rinne lassen eine Differenz bis ca.  $15^\circ\text{C}$  als wahrscheinlich erscheinen. Da diese Abschätzung aber keinen wesentlichen Einfluss auf die weiteren Betrachtungen hat, wurden die  $40^\circ\text{C}$  von der pyrometrisch ermittelten Tropfentemperatur beim Schnitt abgezogen und das Resultat als Eingangsgröße in den Bilanzraum verwendet.

Die Temperatur des Kübels wurde kalorimetrisch bestimmt. Zusätzlich wurde der Wärmeverlust durch Strahlung bei der Übergabe des Kübels aus der Maschine in das Kalorimeter abgeschätzt. Die Addition dieses Energiebetrages mit dem kalorimetrisch bestimmten Wert ermöglicht einen Rückschluss auf die mittlere Temperatur des Kübels.

Nachdem nun die Temperaturen in den einzelnen Schritten des Prozesses bestimmbar waren, ließen sich ein Temperaturverlaufsschema und ein analoges, aus den Temperaturen berechnetes Wärmeinhaltsschema skizzieren. Dadurch sind auch die Verluste darstellbar, also welche Energiebeträge auf der jeweiligen Seite (Vor- und Fertigform) abgeführt werden. Die Ergebnisse sind in der Abb. 1 zusammengefasst. Anhand dieser Darstellung erkennt man, dass der Glasposten auf der Vorformseite eine Energie von 44 kJ und auf der Fertigformseite eine Energie von 133 kJ verliert. Diese Energiebeträge werden jedoch nicht allein von der (aktiven) Formenkühlung abgeführt. Dem Glasposten wird in den verschiedenen Prozessschritten Wärme entzogen, zum Beispiel im Kontakt mit dem Pegel. Im Folgenden werden über Berechnungen diese Energiebeträge abgeschätzt, während eine detaillierte Betrachtung der Vorgänge im nächsten Abschnitt erfolgt.

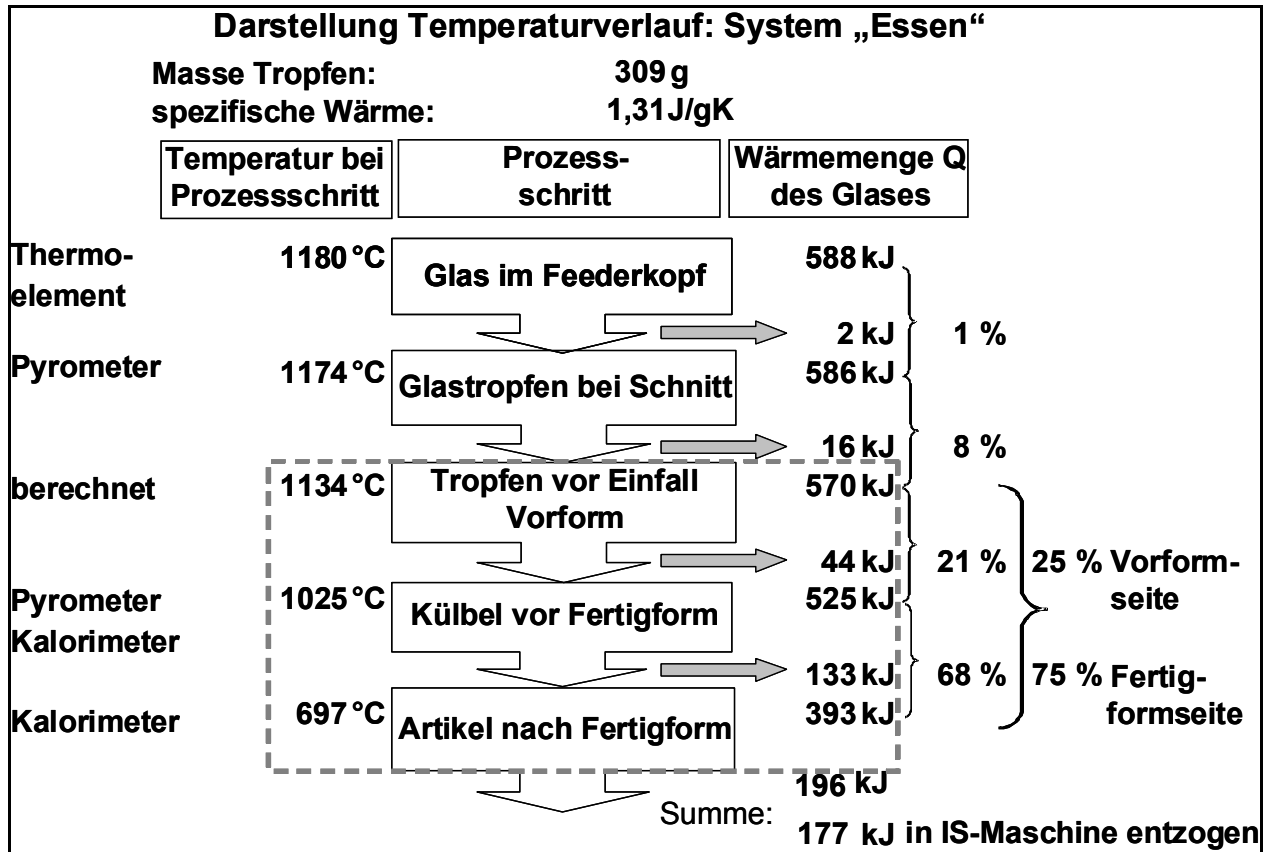


Abbildung 1: Temperaturverlaufsbild

## 6 Das Maschinen-Energie-Bild

Der Glasposten gibt während seiner Bearbeitungsphase bis zum Verlassen der Maschine Energie an verschiedene Medien und Körper außer der Vor- oder Fertigform ab. Diese Wärmeübertragung erfolgt über drei Mechanismen: Strahlung, Leitung und Konvektion. Ein Strahlungsaustausch findet dabei mit allen umgebenden Maschinenteilen, Formen und der Umgebung statt, die näherungsweise als schwarz betrachtet wird. Die Wärmeübergang durch Leitung erfolgt beim Kontakt des Glaspostens mit anderen Körpern, wie den wassergekühlten Scherenmessern, der Rinne samt Emulsion, dem Mündungshalter, dem luftgekühlten Pegel sowie dem Greifer. Die Wärmeübertragung durch Konvektion an die umgebende Luft ist eine Kombination aus freier Konvektion, hervorgerufen durch Temperaturgradienten bedingte Dichteunterschiede der Luft und erzwungener Konvektion, hervorgerufen durch Anblasen oder Zugluft.

Verschiedene in dieser Arbeit getroffenen Annahmen bedürfen einer gesonderten Überprüfung in hoffentlich nachfolgenden Arbeiten zu diesem Thema. Im Folgenden sei ein kurzer Abriss zum grundsätzlichen Vorgehen gegeben:

### 6.1 Wärmeabgabe an den Pegel

Die Artikel wurden im EPB-Verfahren hergestellt. In der Vorform wird ein mit Pressluft gekühlter Pegel nach oben in den heißen Glastropfen gefahren. Dabei entzieht der Pegel dem Glas eine nicht bekannte Energiemenge, die für die Arbeit nur abge-

schätzt werden konnte. Die Abschätzung wurde anhand von Modellrechnungen vorgenommen und bedarf unbedingt einer Überprüfung.

### 6.2 Wärmeabgabe während der Rückerhitzung

In dieser Phase strahlt das KÜbel Energie an die Umgebung ab. Vereinfachend wurde angenommen, dass die Vor- und Fertigform keinen Anteil dieser Strahlung absorbieren. Die Zeit ergibt sich aus der Differenz der Ereignisschaltungen „Fertigform schließen“ und „Vorform öffnen“. In dieser Zeit findet außerdem ein Wärmeentzug durch Konvektion statt.

### 6.3 Wärmeabgabe an die Ausblasluft

Bei dem Durchströmen der heißen Flasche beim Fertigblasen wird dem Glas ebenfalls Energie entzogen, welche demzufolge nicht in die Form eingetragen wird. Die dabei fließenden Wärmeströme wurden aus der Arbeit von Strack [1] entnommen. Die Zeit ergibt sich dabei wieder aus der Ereignisschaltung „Ausblasen“.

### 6.4 Wärmeabgabe während dem Halten über der Abstellplatte

Diese Wärmeabgabe ist wieder gekennzeichnet durch Strahlung und Konvektion. Die konvektiv abgeführte Energie wird wieder über das Modell „Wärmeübergang durch Mischkonvektion an umströmten Körpern – Vertikaler Zylinder“ bestimmt. Die über Strahlung abgegebene Energie wird mit dem Modell „Wärmeabgabe durch Strahlung“ abgeschätzt. Die Haltezeit über der Abstellplatte wurde aus den Ereignissen „Greifer auf“ und „Greifer raus“ bestimmt.

### 6.5 Freie Wärmeabgabe der Formen

Hier wird dargestellt, welche Energiebeträge von der Form über Strahlung und Konvektion abgeführt werden. Diese Anteile der Energie werden also nicht über die aktive Kühlung der Form entfernt.

- Freie Wärmeabgabe der Vorform

Den Anteil der Energie, welcher über Konvektion abgeführt wird, berechnet sich wieder über das Modell: „Wärmeübergang durch Mischkonvektion (überlagerte freie und erzwungene Konvektion) an umströmten Körpern – Vertikaler Zylinder“. Weiterhin wird die über Strahlung abgeführte Energie abgeschätzt.

- Freie Wärmeabgabe der Fertigform

Die freie Wärmeabgabe der Fertigform berechnet sich analog zu den Berechnungen der freien Wärmeabgabe der Vorform.



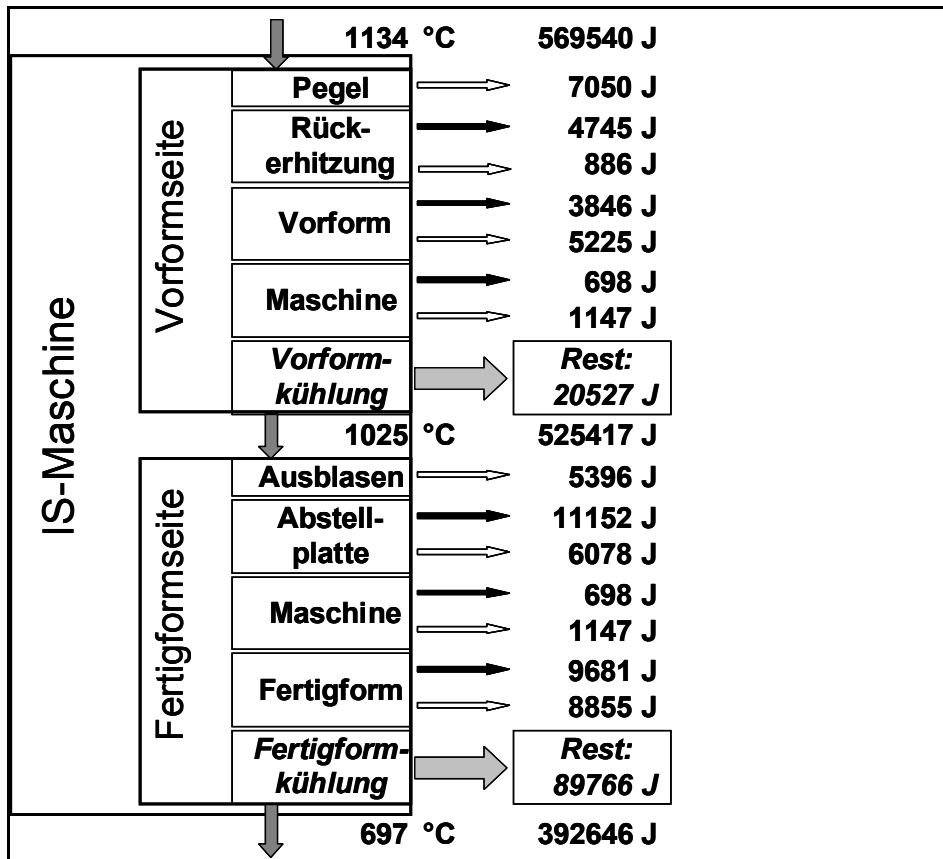


Abbildung 2: Das Maschinen-Energie-Bild

## 6.6 Wärmeabgabe über die Oberfläche der Maschine

Die Maschine bildet aufgrund ihrer Bauteile und den dazugehörigen Abmaßen eine Oberfläche. Diese Oberfläche der Maschine besitzt durch ihre Nähe beziehungsweise durch die Verbindungen zu den Formen eine mittlere Temperatur, deutlich über RT. An dieser Oberfläche findet daher ebenfalls ein Wärmeübergang durch Strahlung und Konvektion statt. Dieser wird über das Modell „Wärmeübergang durch Mischkonvektion an der vertikalen und horizontalen Platte“ und über das Strahlungsmodell berechnet. Um einen Bezug zum einzelnen Glasposten zu bekommen, muss der gesamte berechnete Betrag auf die Anzahl Formen (Fertigformseite und Vorformseite) aufgeteilt werden, damit ergibt sich eine über Strahlung abgeführte Energie pro Form und eine über Konvektion abgeführte Energie pro Form.

## 6.7 Darstellung der Ergebnisse (Maschinen-Energie-Bild)

Aus den ermittelten Temperaturen und den sich daraus ergebenden Wärmegehalten für einen einzelnen Glasposten im jeweiligen Prozessschritt konnten nun, unter Berücksichtigung der berechneten Wärmeabgaben (siehe Abbildung 2: heller Pfeil kennzeichnet konvektiven Wärmeübergang; dunkler Pfeil den Strahlungswärmeübergang), die Energiebeträge ermittelt werden, welche von der aktiven Kühlung abgeführt werden. Diese finden sich in Abbildung 2 wieder und sind dort als Rest bezeichnet.

Aus einer Vorform werden bei Beladung mit einem Tropfen demzufolge knapp 21 kJ über die Formenkühlung abgeführt. Aus der Fertigform müssen über die Kühlung an die 90 kJ entfernt werden.

### 7 Charakterisierung der Kühlluft

Wie vorab beschrieben, wurden die Eingangsparameter der Kühlluft (Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit im Kanal und in den Boxen) mit einem Flügelradanemometer ermittelt. Daraus lassen sich über die Kontinuitätsgleichung der eingesetzte Volumenstrom sowie die Strömungsgeschwindigkeit in den Kühlbohrungen bestimmen. Es war leider nicht möglich, die austretende Kühlluft messtechnisch zu charakterisieren. Eine geeignete Messtechnik stand im Rahmen dieser Arbeit nicht zur Verfügung. Daher wurde die Austrittstemperatur mit Hilfe der abzuführenden „Restenergie“ (siehe Abb. 2) berechnet, die ja auf *einen* Tropfen bezogen ist und demnach einem Energiestrom entspricht.

$$\dot{Q}_{\text{Rest}} = \dot{m}_{\text{Luft}} \cdot c_{p\text{Luft}} \cdot (\vartheta_{\text{Austritt}} - \vartheta_{\text{Box}})$$

Die so berechneten Austrittstemperaturen lagen zwischen 50 und 100°C und stimmten recht gut mit den „per Thermoelement und Hand abgeschätzten“ Daten überein.

### 8 Die Formenkühlung – Wärmeübergang in der Kühlbohrung

Die gemessenen Eingangs- und die berechneten Ausgangsparameter der Kühlluft werden nun in das Modell „Wärmeübergang in der Kühlbohrung“ zur Berechnung herangezogen. Damit kann eine theoretisch mögliche abzuführende Wärmemenge bestimmt werden. Für die Temperatur an der Kühlbohrung wird die nach dem Öffnen der Form gemessene Temperatur der Innenfläche der Form angenommen.

Beim Einsetzen der Parameter in das Modell „Wärmeübergang in der Kühlbohrung“ wird für die Vorform eine theoretisch mögliche abzuführende Wärmemenge von  $Q \approx 75$  kJ berechnet, lt. der vorangegangenen Betrachtungen werden aber nur ca. 21 kJ über die aktive Kühlung der Vorform entfernt. Auch für die Fertigformseite dieses Kühlsystems ist zu sehen, dass der theoretisch mögliche abzuführende Wärmestrom mit 236 kJ fast dreimal so groß ist, als der tatsächlich abgeführte von gerade 90 kJ. Unter der Voraussetzung, dass die Berechnung des theoretischen Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  und des resultierenden theoretischen Wärmeflusses korrekt sind, muss daraus geschlossen werden, dass die abzuführende Energie nicht schnell genug durch die Form an die Übertragungsfläche (Bohrungen) geleitet wird. Der Wärmestrom zur Übertragungsfläche hin ist demnach kleiner, als der theoretisch von der Kühlluft aufzunehmende Wärmestrom. Dies würde bedeuten, dass die Übertragungsfläche deutlich kälter ist (ca. 170°C), als die übrige Form, die außen lt. Pyrometer ca. 310°C heiß ist. Dies hätte Konsequenzen für die Auswahl des idealen Formenwerkstoffes, der Gestaltung der Form sowie die Anzahl und Position von Kühlbohrungen. Die Unterstützung möglicher Optimierungen an den Formen über Modellrechnungen sowie weitere praktische Untersuchungen dieses Problems sind daher dringend anzuraten.

## 9 Vergleich

Abschließend soll eine Gegenüberstellung der in die beiden Bilanzräume eintretenden Kühlluftströme und der durch die aktive Kühlung abgeführten Wärmeströme vorgenommen werden. Beim Vertiflow-Kühlsystem wurde mit 425 m<sup>3</sup> Luft pro Minute ein Wärmestrom von 24 MJ pro Minute abgeführt, was einer Leistung von 400 kW entspricht. Demnach bringt 1 m<sup>3</sup> Kühlluft ca. 1 kW Kühlleistung. Das gemischte Kühlsystem benötigt zur Aufnahme von 39 MJ pro Minute (650 kW) einen Kühlluftstrom von 1536 m<sup>3</sup>/min, was einer Kühlleistung von nur 0,4 kW/m<sup>3</sup> entspricht. Die wesentlichen Ursachen dafür sind schlechtere Wärmeübergangskoeffizienten und kleinere Austauschflächen im gemischten Kühlsystem.

## 10 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit ist es gelungen, ein Kalorimeter zu entwickeln, mit welchem die mittlere Temperatur des fertigen Behälters bei Verlassen der IS-Maschine mit einer hinreichenden Genauigkeit bestimmt werden kann. Über die Messwerte der Kalorimeterversuche ist es möglich, die Energieinhalte des Glaspostens in den einzelnen Prozessschritten zu bestimmen. Über Abschätzungen und Modellrechnungen kann die von der Formenkühlung aufzunehmende Energie bestimmt werden. Ebenfalls über Modelle kann der Wärmeübergang von der Form zum Kühlmedium beschrieben werden. Diese Untersuchungen wurden an zwei verschiedenen Kühlsystemen durchgeführt und können nun als Grundlage zu Optimierungsvorschlägen dienen.

Es konnte die Vermutung bestätigt werden, dass die Radialkühlung einen vergleichsweise geringen Wirkungsgrad hat und entsprechend große Lüfterleistungen erfordert. Das Vertiflow-Kühlsystem verfügt über bessere Wärmeübergangskoeffizienten und größere *wirksame* Austauschflächen. Dennoch scheint das Optimierungspotential lange noch nicht ausgereizt zu sein. Neben diesen, rein geometrischen Aspekten, könnte durch eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit des Formmaterials eine Optimierung des „Luftwirkungsgrades“ erzielt werden. Solche Optimierungsmaßnahmen werden aber den ohnehin vorhandenen Einfluss der Umgebung noch verstärken. Außerdem muss davon ausgegangen werden, dass die Kühlluftströme noch stärker produktspezifisch anzupassen sein werden, als dies bislang geschieht. Unter diesen Bedingungen ist der Einsatz von Frequenzumrichter für die Ventilatoren und eine flexible Auslegung des Regelbereiches anzuraten, um zu jeder Zeit bzw. zu jedem Artikel die passende Kühlluftmenge erzeugen zu können, ohne dabei Leistungsverluste am Lüfter hinnehmen zu müssen.

Mit CMCS bietet die Firma SiliTec GmbH ein solches Regelsystem sowie weitere Optimierungshilfen an. Zusätzliche Information finden Sie unter: [www.silitec.de](http://www.silitec.de) sowie [www.glassnet.net](http://www.glassnet.net)

## 11 Literatur

- [1] Strack, J.: Vergleich des Fertigblasprozesses von Glasflaschen bei Einsatz von Luft bzw. Wasserdampf als Ausblasmedium; Diplomarbeit TU Bergakademie Freiberg 2001
- [2] Unger, L.: Bestimmung des Wärmehaltes und der mittleren Temperatur von Flaschen während des Formgebungsprozesses; Glastechn. Ber. 32 (1959) S.153-157
- [3] Schlünder, E.-U.; u.a.: VDI-Wärmeatlas, Springer Verlag Berlin Heidelberg 1997 8. Auflage; ISBN 3-540-62719-7
- [4] Mc Adams, W.H.; u.a.: Measurements of recovery factors and coefficients of heat transfer in a tube for subsonic flow of air; Trans. Amer. Inst. Chem. Eng. 42 (1946), S.907-925