

Kühlung von Hochleistungsformen hohlglasverarbeitender Maschinen Möglichkeiten mit den Medien Wasser und Luft

Von Lothar Schaar, Obernkirchen

(Vortrag auf dem HVG-Kolloquium „Formenkühlung und Formenherstellung“ am 30. Oktober 1979 in Frankfurt (Main))

(Mitteilung aus der H. Heye Glasfabrik, Obernkirchen)

(Eingegangen am 23. September 1980)

Neue Verfahren und Steuerungen sowie die ständig verbesserte Qualität der Mechanik von Speiser- und Produktionsmaschinen lassen immer höhere spezifische Produktionsgeschwindigkeiten zu. Die Formen Kühlung wird damit für die Fertigungsgeschwindigkeit und die Qualität der Produkte zunehmend zu einem begrenzenden Faktor. Der Trend zu immer leichteren Behältern erzwingt eine gezieltere Glasverteilung, die wesentlich von der Qualität der Kühlung abhängt.

Nach grundsätzlicher Untersuchung der radialen und axialen Anströmung von zylindrischen Körpern mit Gebläseluft sowie der axialen Durchströmung von Formen mit geschlossenen Kanälen wurde die Formenaxialkühlung konzipiert. Tests von mehr als

20 000 h in Produktionsanlagen ergaben, daß die Geräusentwicklung der Formenaxialkühlung um mehr als 10 dB(A) unter den Werten liegt, die bei radialer und offener axialer Anströmung von Formen gemessen worden sind. Der Luftverbrauch ließ sich auf 25 bis 30 %, der Druck auf Werte unter 500 daPa senken.

Die getesteten Wasserkühlungen erwiesen sich als sehr kostengünstig und arbeiteten geräuschlos. Grundsätzliche regelungstechnische Schwierigkeiten, komplizierte Aufbauten und Korrosionsprobleme wurden erkannt. Obwohl die Wasserkühlungen hervorragende Möglichkeiten für die Wirksamkeit, die Lösung des Geräuschproblems und die Wirtschaftlichkeit anbieten, ist die Luftkühlung optimal für kurz- und mittelfristig realisierbare Lösungen.

The cooling of high production moulds on glass container machines. Cooling possibilities with water and air

New processes and methods of control as well as the ever improving mechanical quality of feeders and machines lead to ever increasing production rates. Mould cooling can then become a limiting factor in rate of production and product quality. The present trend to still lighter weight containers requires good glass distribution and this is vitally dependent on the quality of the cooling.

Following basic investigations of radial and axial flows of compressed air around cylindrical bodies, as well as axial flows through moulds with closed channels, the technique of axial mould cooling was conceived. Tests over more than 20 000 h in production units

showed that noise levels were more than 10 dB(A) lower with axial mould cooling than with radial or open axial flows around the moulds. Air consumption was decreased by 25 to 30 % and the necessary pressure reduced to below 500 daPa.

The tested water cooling proved to operate cheap and without noise. Fundamental problems of control, complications in design and corrosion problems were also encountered. Although water cooling has outstanding possibilities in terms of efficiency, noise and economic problems air cooling is the optimum solution in the short and medium term.

Le refroidissement des moules pour cadence de production élevée. Possibilités offertes par les réfrigérants air et eau

Les nouveaux procédés de fabrication et les nouveaux systèmes de commande ainsi que la qualité toujours plus grande de la mécanique des machines de production et des canaux de distribution permettent des cadences de production de plus en plus élevées. Le refroidissement des moules pour satisfaire la cadence de fabrication et la qualité des produits sont près d'atteindre les limites de ses possibilités. La tendance de produire des contenants de plus en plus allégés oblige à avoir une répartition du verre de plus en plus contrôlée qui dépend essentiellement de la qualité du refroidissement.

Après avoir étudié les principes du soufflage radial et axial des corps cylindriques par un courant d'air forcé ainsi que la traversée axiale des moules par des canaux fermés, on a établi les bases du

refroidissement axial des moules. Des essais de plus de 20 000 h sur des installations industrielles montrent que le niveau de bruit est inférieur de 10 dB(A) par rapport à celui mesuré lors d'un soufflage radial et axial libre. La consommation d'air baisse de 25 à 30 % et la pression descend en dessous de 500 daPa.

Les essais de refroidissement par l'eau révèlent que ce dernier est bon marché et ne pas bruyant. On a rencontré des problèmes majeurs de régulation, des problèmes de corrosion et le montage est compliqué. Bien que le refroidissement à l'eau présente des possibilités intéressantes du point de vue de l'efficacité, du bruit et de l'économie, le refroidissement à l'air est le plus satisfaisant pour les réalisations à court et à moyen terme.

Neue Verfahren und Steuerungen sowie die ständig verbesserte Qualität der Mechanik von Speiser- und Produktionsmaschinen lassen immer höhere Produktionsgeschwindigkeiten zu und damit die Formen Kühlung mehr und mehr begrenzend für die Fertigungsgeschwindigkeit und die Qualität der Produkte werden. Der Trend zu immer dünnerwandigen Glasbehältern erzwingt eine gezieltere Glasverteilung, die wesentlich von der Qualität der Kühlung abhängt. In den letzten zehn

Jahren sind bei Heye die Grundlagen für die Entwicklung wirkungsvollerer Kühlungen mit den Medien Wasser und Luft intensiv untersucht worden.

Ein Hauptgrund für die Beschäftigung mit den Kriterien für wirkungsvollere Kühlungssysteme lag in der erfolgreichen Entwicklung einer neuen Technologie für die Produktion von Hohlglas. Die konsequente Anwendung der neuen Methode nach grundlegenden verfahrenstechnischen Erkenntnissen in Verbindung mit

den Möglichkeiten neuester elektronischer Steuerungen ermöglicht den Bau von Maschinen mit weit höherer Stationsgeschwindigkeit, als es der bisherige Stand der Technik zeigt. Diese Maschinen, deren Vorformstationsgeschwindigkeit etwa $2^{1/2}$ - bis 3mal höher als die konventioneller Maschinen ist, erfordern zwangsläufig eine erheblich höhere Kühlungswirksamkeit an den Formen. Neue, vor allem extrem leichte Produkte, deren Verwendung zunehmend im Bereich technischer Gläser zu finden ist, fordern zugleich eine erheblich höhere Kühlungsqualität in der Vorformphase des Glasherstellungsprozesses.

Die Forderungen nach wirtschaftlicher Produktion beinhalten u. a. die Senkung des Glasbehältergewichtes, die Anhebung der Produktionsgeschwindigkeit und der Ausbeute. Es besteht eine starke Abhängigkeit dieser wirtschaftlichen Aspekte von der Kühlungsqualität einerseits (Produkte) und der Kühlungsquantität andererseits (Geschwindigkeit). In den letzten Jahren wurde mit steigendem Umweltbewußtsein die Forderung nach humaneren Arbeitsplätzen vorrangig. Eine sehr starke Beeinträchtigung des Menschen am Arbeitsplatz „Hohlglasmaschine“ stellt neben anderen die sehr hohe Lärmbelastung durch die Formenkühlung dar. Im unmittelbarem Arbeitsbereich liegen die Lärmpegel z. Z. zwischen 100 und 110 dB(A).

1. Kühlsysteme

Die gebräuchliche Art der Kühlung von Formen hohlglasverarbeitender Maschinen ist die mit Gebläseluft, die aus maschinenfest angeordneten Düsen austritt und als Bündel von Freistrahlen radial auf die Formoberfläche geleitet werden soll. Diese Art der Kühlung, die sich durch die Verwendung des physiologisch völlig unbedenklichen Mediums Luft und einen relativ einfachen und unproblematischen Kühlaufbau auszeichnet, weist jedoch eine Reihe erheblicher grundsätzlicher verfahrenstechnischer Mängel auf.

Bild 1 zeigt den Verlauf des Wärmeübergangs bei idealer radialer Anströmung eines Zylinders durch eine flache Düse. Die starke Änderung der Wärmeübergangszahlen von etwa 150 Einheiten am Staupunkt der Strömung auf Werte zwischen 50 und 100 zeigt das grundsätzliche Verhalten bei radialer Anströmung. Der Verlauf des Wärmeübergangs kann selbst bei idealer Strömungsausbildung nicht den technologischen Forderungen an eine optimale Formenkühlung genügen. Die der Darstellung zugrunde liegenden Messungen wurden vom Autor am Hermann-Föttinger-Institut der Technischen Universität Berlin gemacht.

Eine zweiseitige radiale Anströmung zylindrischer Formen mit aufeinander gerichteten Luftstrahlen verstärkt die unerwünschten Erscheinungen noch erheblich. Die gegenseitige Beeinflussung der Freistrahlen und die unvermeidbare Störwirkung durch die in der Praxis notwendigen Formenaufhängungen verringern die Effektivität der Kühlung derart, daß die Produktionsge-

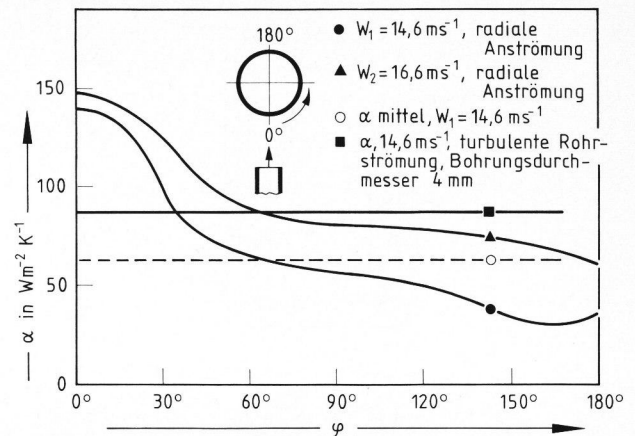


Bild 1. Wärmeübergang radial angeströmter Zylinder – Luft.

windigkeit von Glasmaschinen häufig durch die Wirksamkeit der Kühlung an den Fertigformen bestimmt wird. Die zweiseitige Anströmung der Vorformen verhindert dazu noch die auf dem Formenumfang technologisch notwendige differenzierte Abfuhr der Wärme.

Bei der Suche nach alternativen Kühlungssystemen wurden folgende grundsätzliche Möglichkeiten des Wärmeentzugs in Betracht gezogen:

- Der Einsatz flüssiger Medien in einem geschlossenen Kreislauf ohne Ausnutzung eines Phasenwechsels. Hier wäre die Möglichkeit einer Energierückgewinnung gegeben, die Maschinen wären nicht korrosionsgefährdet.
- Der Einsatz flüssiger Medien unter Ausnutzung des Phasenwechsels. Hier wären die Vorteile der sehr hohen spezifischen Kühlleistung und einer Abfuhr der Wärme in latenter Form gegeben.
- Der Einsatz gasförmiger Medien. Hier besteht der Vorteil, auf bekannte Technologien zurückgreifen zu können.
- Die kontaktlosen Methoden, bei denen der Wärmeentzug über den Strahlungsaustausch zwischen der Formoberfläche und einem Kühlaufbau gesteuert werden kann.

Nach Wertung der grundsätzlichen physikalischen Möglichkeiten, des wahrscheinlichen Zeit- und Kostenaufwandes für die Entwicklung und unter Beachtung physiologischer Aspekte sind die Medien Wasser und Luft als die aussichtsreichsten ausgewählt und intensiv untersucht worden. Nicht untersucht wurden die anfangs auch in Betracht gezogenen Medien Edelgas, Öle, synthetische Wärmeträger und Quecksilber. Nach einer Reihe von Voruntersuchungen sind insgesamt vier Systeme gebaut und unter Produktionsbedingungen erprobt worden.

- Eine Wasserdurchflußkühlung, bei der kein Phasenwechsel ausgenutzt werden sollte.
- Eine Sprühkühlung, bei der durch offene Versprühung von Wasser die Formoberfläche benetzt wird. Das aufgesprühte Wasser soll vollständig verdampfen.

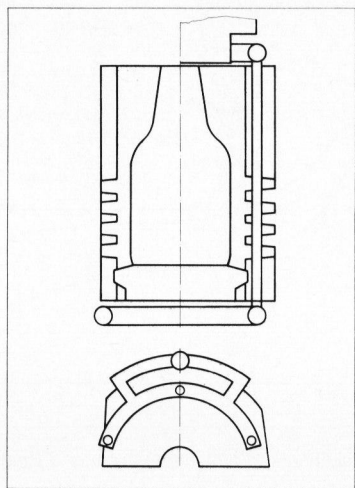


Bild 2. Aufbau einer Fertigform für eine Wasserdurchflußkühlung.

3. Eine Kühlung durch Anströmung der Formenoberfläche mit Luft. Die Strömungsrichtung verläuft parallel zur Formenachse.

4. Die Durchströmung der Formenwand mit Luft ebenfalls in axialer Richtung.

Mit der modernen Hohlglasproduktion ist immer eine bis an die Grenze des Möglichen gehende Zwangsformung des Glases verbunden. Das Hauptmerkmal dieses Vorgangs ist gekennzeichnet durch den Kontakt zwischen Glas und Metall, wobei Temperaturdifferenzen von 400 bis 800 °C in der Grenzfläche auftreten. Beim ersten Kontakt zwischen schmelzflüssigem Glas und Metall beträgt die Wärmestromdichte mehr als 200 W/cm². Nach etwa 2 s ist die Wärmestromdichte auf einen Wert von etwa 40 W/cm² abgesunken. In den meisten Zwangsformungsphasen, d. h. beim Pressen und Festblasen, wird im Mittel nach 2 bis 4 s der Kontakt zwischen Glas und Metall wieder aufgehoben. Die mittlere Wärmestromdichte während einer Kontaktdauer beträgt angenähert 80 W/cm². Bei hochbelasteten Formen mit bekannter Geometrie sind über die äußere Oberfläche etwa 10 W/cm² abzuführen, wenn eine Dauerkühlung vorliegt. Bei Preßstempeln — die Glaskontaktzeit beträgt etwa 1,5 s — sind etwa 30 W/cm² abzuführen.

Strömendes und verdampfendes Wasser ist in der Lage, etwa 200 W/cm² Wärmetauschfläche abzunehmen, wobei die Temperaturdifferenz zwischen den Austauschpartnern maximal 30 K betragen darf. Strömende Luft, deren Geschwindigkeit nahe an der Schallgeschwindigkeit liegt, kann etwa 20 W/cm² abführen.

Die Kühlungswirksamkeit strömender Luft ist bei Formen ausreichend hoch, bei Preßstempeln reichen die Möglichkeiten für die hochbelasteten Zonen theoretisch nicht aus. Der Wärmeentzug durch Strahlung und freie Konvektion über die äußere Oberfläche hochbelasteter Preßstempel ist zur Erzielung quasistationärer Zustände unbedingt notwendig. Verdampfendes Wasser auf Me-

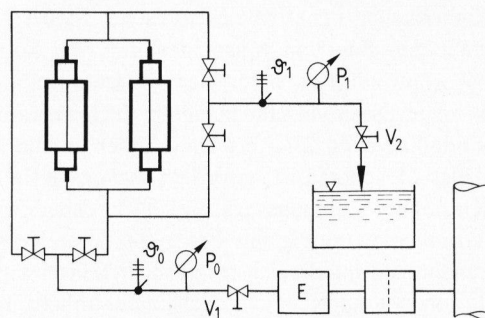


Bild 3. Prinzipielle Darstellung des Versuchsaufbaus zur Untersuchung der Wasserdurchflußkühlung.

tallflächen, gemessen an waagrecht betriebenen offenen Rillenkapillarverdampfern, läßt, wenn die Plattentemperatur 140 °C überschreitet, noch eine Wärmestromdichte von angenähert 15 W/cm² zu. Diese Verhältnisse sind mit hoher Wahrscheinlichkeit an den Formenoberflächen beim praktischen Betrieb einer Verdampfungskühlung anzutreffen, wobei die genannten Werte wegen der vornehmlich senkrecht dargebotenen Formenoberflächen wahrscheinlich nicht ganz erreicht werden.

2. Kühlung mit dem Medium Wasser

2.1. Wasserdurchflußkühlung

Bild 2 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer Testform. Das Testobjekt stellt die Fertigform für die Produktion einer 1/3-l-Bierflasche dar. Die Form ist in drei Segmente eingeteilt. In der Mitte jedes Segments ist ein Kupferröhrchen mit einem Innendurchmesser von 3 mm längs an der Form heruntergeführt und mit den Rippen verlötet, die für eine Luftkühlung üblicherweise angebracht werden. Pro Form wird durch 84 Lötstellen eine Kontaktfläche von 20 cm² mit den Kupferröhrchen geschaffen. Das Kühlwasser wird durch ein Verteilungssystem der Form zugeführt, durch ein Sammlersystem wieder abgeführt.

Bild 3 zeigt den schematischen Aufbau der Versuchsanordnung. Die Formen können mit Kühlwasser sowohl von oben nach unten als auch umgekehrt durchströmt werden. Mit Hilfe der Ventile V1 und V2 ist der gewünschte Systemdruck einstellbar. Die Ventile V1 und V2 haben eine Doppelfunktion. Außer der Höhe des Systemdrucks ist mit ihrer Hilfe auch die Durchflußmenge zu steuern. Mit Hilfe einer Durchflußmengenmessung und der Bestimmung der Eingangs- und Ausgangstemperaturen kann die Ermittlung der abgeführten Wärmemenge erfolgen.

Bei einem Systemdruck von etwa 1 bar wurde eine Wärmeabfuhr von 5 bis 6 kJ/s gemessen. Bei Änderung der durchströmenden Kühlwassermenge im Verhältnis 8,5 : 1 stieg die Temperaturdifferenz von 9 auf knapp 80 °C an. Eine deutliche Änderung des Wärmeentzugs konnte nicht gemessen werden, die entzogene Wärme-

menge betrug nach wie vor 5 bis 6 kJ/s. Die Glasbehälteroberfläche war bei diesem Versuch zu kalt, der Artikel neigte zu Rissen. Die Produktionsgeschwindigkeit betrug 9 Artikel/min. Bei Anhebung des Systemdrucks auf 3,5 bar durch entsprechende Vertrimmung der Ventile V1 und V2 wurde eine bessere Behälterqualität erzielt. Die Austrittstemperatur des Kühlwassers wurde dabei mit 95 °C ermittelt. Bei einem Systemdruck von 3,5 bar wurde eine Erhöhung der Hubzahl von 9 auf 12 Artikel/min durchgeführt. Die Behälterqualität entsprach jetzt den üblichen Forderungen. Mit der Änderung der Hubzahl ist eine Änderung der entzogenen Wärmemenge verbunden. Das Verhältnis von abgeführter Wärmemenge zur Hubzahl bleibt angenähert konstant.

Die Veränderung der Kühlmittelmenge und damit der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers in den Kupferrohrchen allein macht eine Regelung der Formentemperatur praktisch nicht möglich. Die Änderung des konvektiven Anteils ist von untergeordneter Bedeutung für die Höhe des Wärmeentzugs. Der Wärmeentzug wird durch die Verdampfung des Wassers infolge Blasensiedens an der Innenwand des Kupferrohres beherrscht. Eine deutliche Abhängigkeit der entziehbaren Wärmemenge von der Höhe des Systemdrucks ist jedoch gegeben. Die Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Kühlmedium und der Rohrwand von der Höhe des Systemdrucks ist die Ursache. Hier besteht also eine Eingriffsmöglichkeit in den Wärmeentzugsprozess mit reproduzierbarer Wirkung und damit auch eine Regelungsmöglichkeit. Die rein praktisch ausgerichteten Versuche waren nicht geeignet, die Abhängigkeiten zu quantifizieren. Die Arbeit von Schumacher „Anwendung eines Wärmetauschermodells auf Preßstempel“ greift dieses Problem grundsätzlich auf.

2.2. Sprühwasserkühlung

Diese Version erlaubt die Kühlung von Formen durch Ansprühen ihrer Oberfläche mit Wasser.

Bild 4 zeigt den Aufbau einer Vor- und Fertigformstation mit einer Doppelformausrüstung. Die Sprühdüsen sind bei dieser Version fest in die Formenhalter eingebaut und weisen einen Abstand von 22,5 mm von der Formenoberfläche auf. Die Darstellung des Aufbaus veranschaulicht die prinzipielle Anordnung der in die Halter eingesetzten Düsen und die Zusammenschaltung zu Gruppen. Die Fertigform kann in insgesamt vier Ebenen besprüht werden, wobei die drei oberen Ebenen für die geteilten Formen und die vierte Ebene für den Fertigformboden vorgesehen ist. Die Vorformdüsen sind in zwei Ebenen angeordnet. In jeder Ebene sind Düsen zu Gruppen zusammenschaltbar. Das Wasser wird ohne Zuhilfenahme von Druckluft zerstäubt. Der örtliche Wärmeentzug an den Formen ist über die Beaufschlagungszeit zu steuern. Die Steuerung erlaubt es, ein beliebiges Tastverhältnis einzustellen. Die Formenoberflächen sind unverrippt, jedoch angeraut. Die Rauigkeit beträgt 300 µm. Das Kühlungsmedium besteht aus ent-

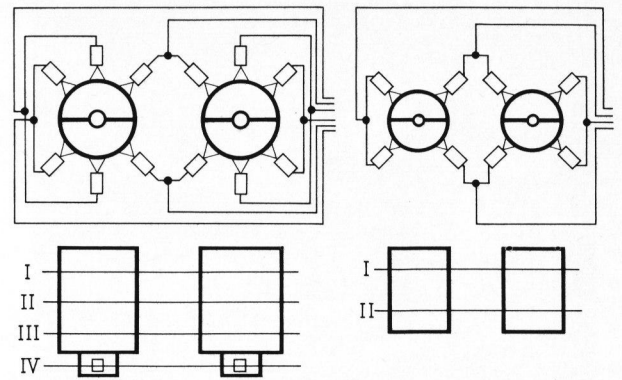


Bild 4. Prinzipielle Darstellung des Versuchsaufbaus zur Untersuchung der Sprühwasserkühlung mit mitbewegten, halterfesten Düsen.

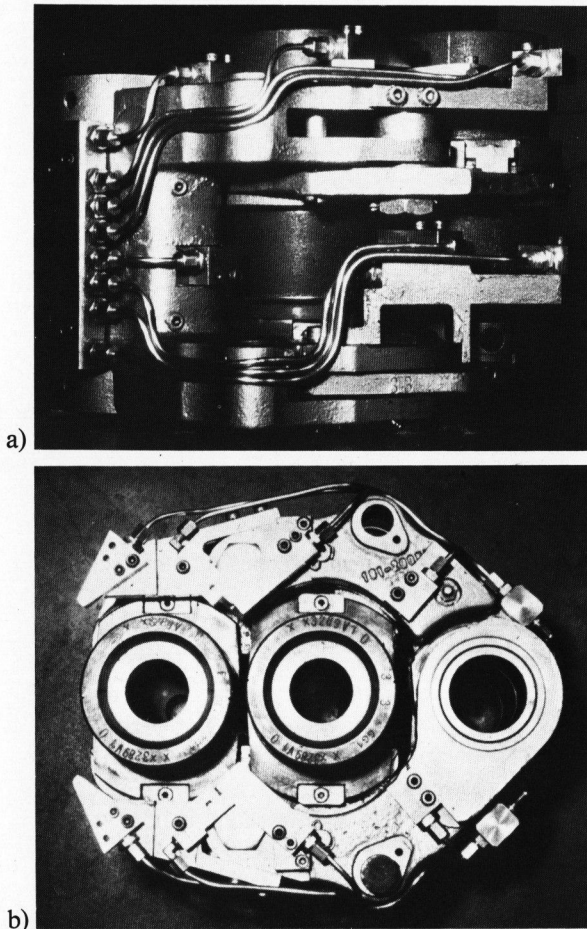
mineralisiertem Wasser mit einem Abdampfdruckstand von weniger als 2 mg/l.

Die Versuche wurden mit 90°-Vollkegeldüsen gefahren, deren Durchmesser 0,2 und 0,3 mm betragen haben. Das Tastverhältnis wurde zwischen 20 und 50 % der Zykluszeit ermittelt. Bei einem Versorgungsdruck von etwa 4 bar zeigte sich bei den verwendeten Vollkegeldüsen ein optimales Sprühbild. Die praktischen Versuche wurden mit dem dargestellten Kühlaufbau auf einer 2-Stationen-IS-Maschine gefahren. Die Dauer der Untersuchung betrug vier Wochen.

Die Qualität der Glasprodukte war von bekannter Art. Vergleiche mit Flaschen aus luftgekühlten Formen ergaben jedoch, daß die Glasverteilung der Flaschen aus wassergekühlten Formen gleichmäßiger war. Neue Fehlerarten wurden am Produkt nicht entdeckt. Die Stückausbeute bei kontinuierlichem Betrieb betrug etwa 95 %. Bei einigen Formen traten an den glasberührenden Innenflächen Risse auf, die bei luftgekühlten Formen nur sehr selten und nicht so stark in Erscheinung treten.

Die Bilder 5a und b zeigen fotografische Aufnahmen der mit Düsen ausgerüsteten Halter für die IS-Maschine. Die Versorgung der Düsen mit Wasser erfolgt über Leitungen aus Kupferrohr. Der Wasserverbrauch während des Versuchs betrug durchschnittlich 100 bis 150 l/h. Von dieser Kühlmittelmenge wurde jedoch nur ein Bruchteil verdampft. Bild 6 zeigt die Wassersprühkühlung im Einsatz auf der Vorformstation einer IS-Maschine.

Parallel zu den Untersuchungen auf der IS-Maschine wurde die Wirkung der Kühlung an der Blockform der H-1-2-Pilotmaschine untersucht. Die zylindrische Wand und der Boden der Form konnten durch getrennte Kanäle versorgt werden. Das Kühlwasser wurde durch drei Düsen am Zylinderumfang und eine Düse am Boden der Vorform aufgesprüht. Die Höhe des Wärmeentzugs wurde bei konstantem Wasserdruck durch die Dauer der Besprühung geregelt. Es wurden diverse Blockformen für Hohlglasbehälter mit Gewichten zwischen 85 und 360 g untersucht. Die Zahl und Anordnung der Düsen erforderten möglichst große



Bilder 5a und b. Mit halterfesten Sprühdüsen ausgerüstetes IS-Vorformscharnier;
a) Seitenansicht, b) Draufsicht.

Sprühwinkel. 120°-Düsen standen als neu entwickelte Hohlkegeldüsen mit Bohrungsdurchmessern von 0,1 bis 0,3 mm zur Verfügung. Die Düsen waren in Abständen von 10 bis 25 mm von der Formenoberfläche gleichmäßig am Umfang verteilt montierbar, die Sprührichtung war radial. Die Düse am Boden der Form sprühte in axialer Richtung. Ihr Abstand vom Boden war einstellbar zwischen 15 und 30 mm. Die Sprühzeiten betragen 10 bis 75 % der artikelabhängigen Zykluszeiten. Der Sprühdruck lag zwischen 4 und 8 bar, der Wasserverbrauch belief sich auf 2,8 bis 4,6 l/h und Form. Eine vollständige Verdampfung des Wassers war auch hier nicht gegeben.

Der H-1-2-Prototyp wurde während der zehn Monate dauernden Versuche auf der Vorformseite ausschließlich mit Wasser gekühlt. Die Wärmeabfuhr war in allen Fällen ausreichend hoch. Die Temperaturverteilung war besser bestimmbar als mit der bis dahin verwendeten Art der Kühlung durch axiale Anströmung der Oberfläche mit Luft. Eine gute Reproduzierbarkeit des Kühlungsverhaltens ermöglichte konstanten Lauf des Prozesses. Eine Beeinträchtigung der Formen durch Zerstörung der Oberfläche oder Ablagerungen traten nicht auf. Trotz der offenen Versprühung des Kühlwas-

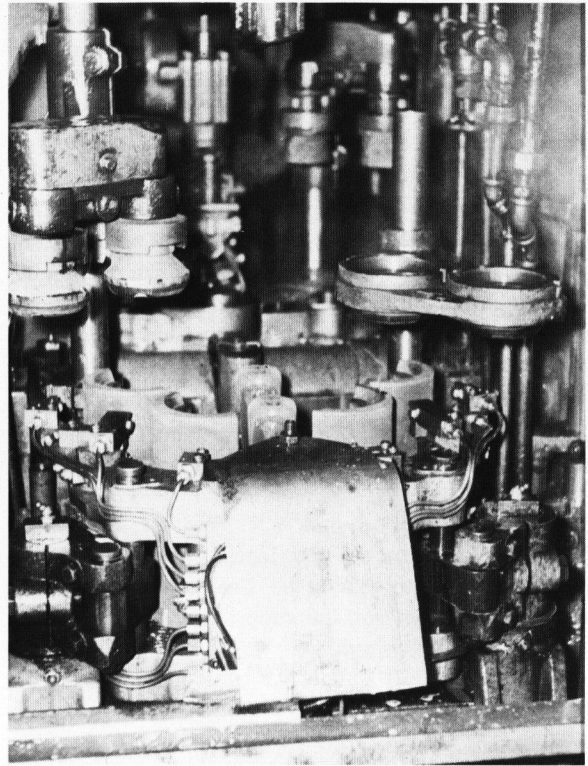


Bild 6. Wassersprühkühlung im Einsatz auf der Vorformseite einer IS-Maschine.

sers blieb die Maschine relativ trocken. Hin und wieder war jedoch bei konstant laufendem Prozeß ein Verlassen des thermischen Beharrungszustandes der Form zu beobachten. Für die Form ergab sich dann, ohne daß offensichtlich Randbedingungen verändert worden waren, ein meist höheres Temperaturniveau. Erst nach Abkühlung der Form und einem erneuten Anfahren war der alte Beharrungszustand wieder zu erreichen. Dieses Phänomen ist nicht näher untersucht worden, so daß nicht ausgeschlossen werden kann, daß sich unbemerkt die beeinflussbaren Randbedingungen dennoch verändert hätten.

Alternativ zu der Version mit halterfesten Düsen wurde an der IS-Maschine eine Versuchsreihe mit einer Fertigformkühlung gefahren, bei der die Sprühdüsen fester Bestandteil des Maschinenbettes waren. Ein Düsenstock wurde dort montiert, wo die Luftdüsen der Radialkühlung normalerweise ihren Platz haben. Die Benetzung der zu kühlenden Formen wurde mit Hilfe von Glatzstrahldüsen mit 0,2 mm Durchmesser vorgenommen. Die Besprühungsdauer war einstellbar, so daß der Wärmeentzug über die Dauer der Sprühzeit geregelt werden konnte. Es wurden die Fertigformaufbauten im Doppelformbetrieb getestet. Die Wärmeabfuhr war in allen Versuchen ausreichend hoch. Das Testobjekt „Eurobieflasche“, auf einer 8-Stationen-Maschine gefahren, ließ eine Schnittgeschwindigkeitssteigerung von etwa 7 % zu. Die Glatzstrahldüsen erlaubten einen unproblematischen Sprühbetrieb. Gerissene Formen wurden nicht beobachtet. Der Verbrauch an Kühlwasser betrug

etwa 80 l pro Fertigformstation und h. Jedoch haben mangelhafte örtliche Dosierungsmöglichkeiten – das ist systembedingt – unbefriedigende Behälterqualität gebracht. Das Problem der Rißbildung im Nahtbereich der Produkte war nicht beherrschbar. Ein Regulativ zwischen Formenwand und Kühlungsaufbau wurde notwendig, brachte aber keine grundsätzliche Abhilfe. Bleche mit empirisch ermittelter Lochstruktur und Zwischenlagen aus Siebgewebe wurden getestet. Beharrungszustände waren nur sehr schwer erreichbar.

Die großen Probleme angemessener örtlicher Dosierung des Kühlmediums und die damit verbundenen Schwierigkeiten in der Regelung ließen eine Übertragung des Systems auf die thermodynamisch weit anspruchsvollere Vorformseite nicht zu.

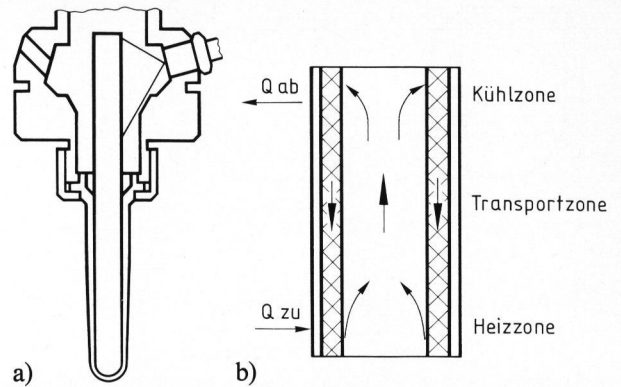
2.3. Preßstempelwasserkühlung

Die Kühlung von Preßstempeln mit Wasser ist schwierig. Die Probleme werden größer mit geringer werdendem Durchmesser und steigender Länge des Stempels. Die Stempelwandungen werden dann sehr gering und stellen das eigentliche Problem dar. Bei Enghals-Preß-Blas-Stempeln beträgt die Wanddicke im glasberührenden Teil zwischen 2 und 5 mm. Erfolgt der Preßvorgang sogar noch derart, daß der Stempel von oben nach unten in die Vorform und damit in das Glas eingeführt wird, ist eine direkte Kühlung des Preßstempels mit Wasser grundsätzlich nicht möglich. Um jedoch auch in solchen Fällen die Möglichkeit ökonomischer und geräuschloser Kühlung zu schaffen, ist theoretisch eine Preßstempelkühlung unter Einschaltung eines Wärmerohrs denkbar.

Bild 7a zeigt den Aufbau eines solchen Systems. Das in den Preßstempel integrierte Wärmerohr ragt mit seiner Kühlzone in einen Raum, in welchem eine Düse Wasser auf die Wärmerohroberfläche sprühen kann. Das verdampfte Kühlmedium verläßt auf der linken Seite durch eine Bohrung den Kühlraum. In Bild 7b ist das Wärmerohrprinzip veranschaulicht. Die in der Heizzone zugeführte Wärme läßt einen Wärmeträger verdampfen. Das aus der Kapillarstruktur ausdampfende Mittel transportiert die Wärme im Zentrum des Rohres in latenter Form in die Kühlzone. Der dort stattfindende Wärmeentzug läßt das Wärmeträgermittel kondensieren. Nach der Kondensation strömt der Wärmeträger in seiner flüssigen Phase durch eine Kapillarstruktur zur Heizzone zurück. Aufbau und Wirkungsweise von Wärmerohren für den Einsatz in der Glasindustrie sind in ausführlicher Form in der Arbeit von Schubert behandelt.

Die Arbeitsweise dieses Systems veranschaulicht eine Beschreibung des typischen Verhaltens bei der Produktion eines 85 g schweren Hohlglasartikels auf der H-1-2-Maschine.

Nach Anlauf der Maschine und Glaszufuhr wurde zunächst ohne Kühlung angefahren. Nach etwa zehn Arbeitstakten zeigte der Preßstempel eine hellrot leuch-



Bilder 7a und b. Schematische Darstellung a) eines Wärmerohr-Preßstempels und b) der Wärmerohrfunktion.

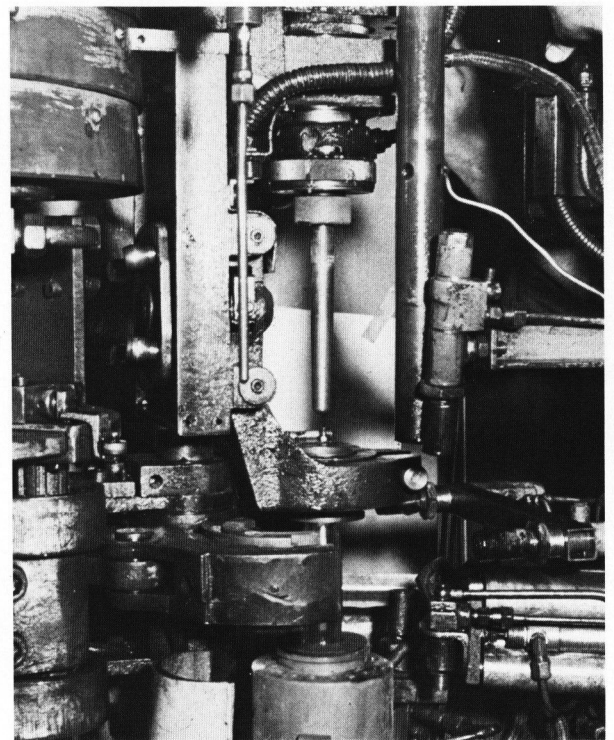
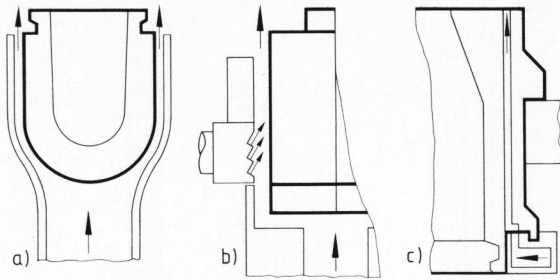


Bild 8. Einsatz des Wärmerohrstempels in der Vorformstation des H-1-2-Prototyps.

tende Spitze. Darauf wurde die Glaszufuhr für zwei bis drei Takte unterbrochen, dann wieder aufgenommen und die Wasserkühlung eingeschaltet. Nach etwa 10 min hatte der Wärmerohrstempel in der Kühlzone etwa 400 °C Beharrungstemperatur erreicht. Mit einer Arbeitsgeschwindigkeit von 11,2 Belegungen der Form/min mit Glas und einer Kontaktzeit von 0,8 s lief der Formprozeß quasi konstant und aus glastechnologischer Sicht akzeptabel. Der Stempel arbeitete konstant im Bereich sichtbarer Rotglut, wobei die Preßstempelspitze immer eine etwas höhere Farbtemperatur zeigte als der übrige glasberührende Teil des Stempels. Bei Verlängerung der Sprühdauer auf eine Zeit von mehr als 0,2 s füllte sich die Kühlkammer langsam mit Wasser.



Bilder 9a bis c. Grundsätzlicher Strömungsverlauf bei Anwendung der Axialkühlung mit Luft;

- a) Kühlung einer H-1-2-Blockform,
- b) Kombinationslösung aus axialer Hauptströmung und radialer Zusatzanströmung,
- c) Durchströmung der Formenwand.

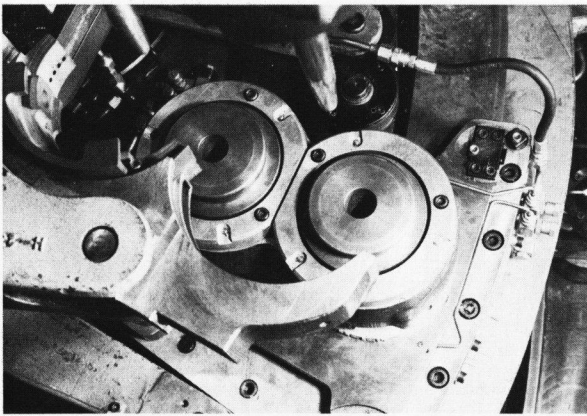


Bild 10. Blockformstation ausgerüstet für eine Kühlung mit Luft nach dem Prinzip der axialen Anströmung der Formenoberfläche.

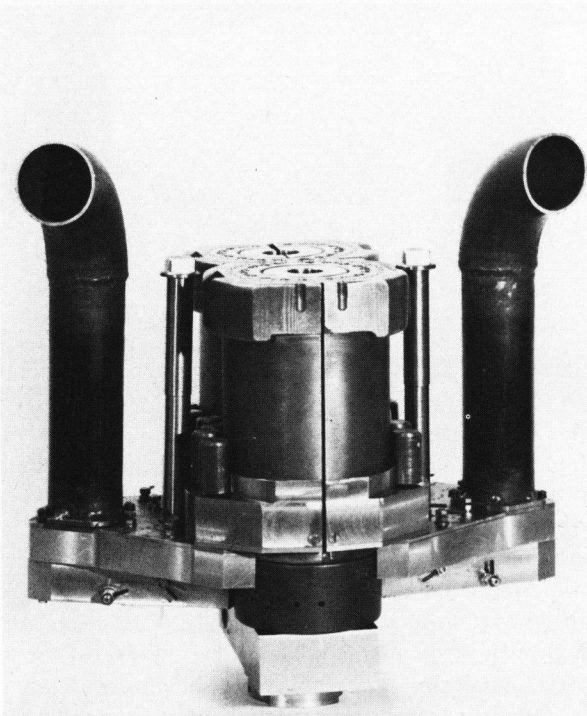


Bild 11. Fertigformen ausgerüstet für eine Kühlung mit Luft nach dem Prinzip der axialen Durchströmung der Formenwand.

Der Stempel begann Sekunden danach, seine fast gleichmäßige Temperatur zu verlieren. Die Temperatur des Stempels stieg insgesamt an, wobei die Spitze immer die heißeste Partie blieb. Etwa 2 bis 3 min nach Änderung der Kühlung war die Temperatur des Preßstempels so weit angestiegen, daß die Glasmasse an der Spitze zu kleben begann. Die Leistung des Wärmerohrsystems, gemessen an der über die Kühlzone abgeführten Wärmemenge, während des dynamischen Einsatzes des Wärmerohrs betrug nur 85 W. Eine Labormessung hatte unter statischen Randbedingungen eine Leistung von mehr als 700 W ergeben.

Obwohl der Preßstempel mit 11 Preßvorgängen/min und einem Wasserverbrauch von weniger als 100 ml/h geräuschlos lief, lassen Kosten (der Herstellungspreis des Wärmerohrs beträgt mehrere tausend Mark), mangelnde Beherrschung der Herstellung von Mitteltemperaturwärmerohren eine mittelfristige Lösung des Gesamtproblems nicht erwarten. Bild 8 zeigt den Wärmerohrstempel in Betrieb in der H-1-2-Prototyp-Maschine.

3. Kühlung mit dem Medium Luft

Anlaß für eine erneute grundsätzliche Beschäftigung mit der Luftkühlung war nicht zuletzt die noch unbefriedigende und schwierige Regelbarkeit aller untersuchten Wasserkühlungssysteme. Trotz erfreulicher Anfangserfolge blieb zu erwarten, daß der Entwicklungsaufwand und die notwendige Zeit zur Realisierung funktionstüchtiger Ausrüstungen erheblich sein würden. Die notwendige Betriebssicherheit der Anlagen zu erreichen, hätte ebenfalls noch einer längeren Entwicklungszeit bedurft. Die Tatsache, daß sowohl die H-1-2- als auch die H-6-12-Maschine nicht konsequent für die Ausrüstung mit Wasserkühlungen ausgelegt sind, stellte einen weiteren Antrieb zur Suche nach einer leistungsgerechten Luftkühlung dar.

Untersuchungen am Hermann-Föttinger-Institut in Berlin hatten die Nachteile der radialen Anströmung von Formen deutlich werden lassen, wie Bild 1 veranschaulicht. Aus Gründen der Kühlungswirksamkeit und der Kühlungsqualität (d. h. im wesentlichen örtliche Dosierbarkeit) wurde alternativ zu der radialen Anströmung der Formen die Wirkung einer axialen Strömung untersucht. Die Bilder 9a bis c zeigen in vereinfachender Darstellung die untersuchten Methoden. In Bild 9a ist die Kühlung einer H-1-2-Blockform mit axialer Anströmung mit Gebläseluft dargestellt. Mit dieser Art der Luftführung (Druck etwa 500 daPa \approx 500 mm WS) wurde zwar eine erhebliche Verbesserung der Gleichmäßigkeit der Kühlung und damit der Qualität der Glasbehälter in bezug auf die Glasverteilung erzielt, jedoch konnte eine Produktionsgeschwindigkeit von etwa 12 Schnitt/min nicht überschritten werden. Bild 10 zeigt zwei Blockformen in eingebautem Zustand. So erfreulich das qualitative Ergebnis auch war, so wenig reichte die quantitative Wirkung für eine Maschine aus, deren Indexgeschwindigkeit bei 40 bis 45 Preßvorgängen pro

Station und min liegt. An der Fertigform war die Wirkung der in Bild 9b dargestellten Anordnung ausreichend hoch, jedoch verhalf erst die zusätzlich eingebrachte halbaxiale Anströmung der unteren Zylinderpartie zu der notwendigen Leistungsfähigkeit von etwa 20 Belegungen pro min und Form. Das führte zwangsläufig zu einer beträchtlichen Zunahme des Luftverbrauchs und der Geräuschentwicklung. Erst die Durchströmung der Formenwand (Bild 9c) in im wesentlichen längs orientierten Bohrungen brachte den notwendigen Erfolg sowohl in qualitativer als auch quantitativer Hinsicht. Bild 11 zeigt die Ausrüstung von zwei Fertigformprototypen. Ein sehr erfreuliches, weil nicht unbedingt erwartetes Ergebnis der ersten praktischen Versuche war die erhebliche Verringerung des Kühlluftbedarfs um 60 bis 80 % der üblichen Menge. Eine Messung des Geräuschpegels ergab eine Verringerung um etwa 10 dB(A).

Bild 12 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Formenaxialkühlung an einer für die IS-Maschine typischen Anordnung der Vor- und Fertigformen. Die Formwerkzeuge werden sowohl auf der Vorform- als auch auf der Fertigformseite in axialer Richtung in mehreren separaten Segmenten mit Gebläseluft durchströmt. Die im Bild dargestellte Anordnung der Regel- und Meßinstrumente macht eine unterschiedliche Beaufschlagung auf Vor- und Fertigformseite mit Kühlluft möglich. Eine unterschiedliche Kühlungswirkung an den rechten und linken Formhälften läßt sich ebenfalls einstellen sowie eine Beaufschlagung der einzelnen Formsegmente mit einem Kühlluftdruck, der von 0 bis 100 % des Versorgungsdrucks reicht. Die physikalischen Grundlagen, die zu der endgültigen Auslegung des Systems geführt haben, und die Ergebnisse von Langzeittestläufen ebenso wie die Auswirkung dieser Kühlungsmethode auf die Wirtschaftlichkeit von Produktionslinien werden in einer späteren Arbeit dargestellt. Die wichtigsten, bei der Produktion von 0,33-l-Bierflaschen ermittelten Ergebnisse, die in insgesamt mehr als 1000 h unter Produktionsbedingungen allein auf einer 8-Stationen-IS-Maschine erzielt wurden, sind im folgenden dargestellt.

Die Bedienbarkeit einer Produktionsanlage, ausgerüstet mit der Formenaxialkühlung, ist einfacher und sicherer als im Fall konventioneller Ausrüstung, d. h. mit offener Radialkühlung, da reproduzierbare Einstellungen der Regelorgane durch Erfassung objektiver Meßdaten möglich sind. Eine Auswirkung auf die Glasprodukte tritt deutlich zutage. Die Glasverteilung in den Behältern kann gleichmäßiger erzeugt werden. Bei der Ermittlung der Behälterfestigkeit zeigte sich eine Erhöhung des Berstdruckes um 10 bis 20 %. Die übrigen Festigkeitswerte erfuhren keine Änderung gegenüber einer Fertigung mit konventioneller Kühlung. Die Formenaxialkühlung erlaubte bisher außerdem eine Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeit um 4 und eine Verbesserung der Gesamtausbeute um 2 %. Lärmpegelmessungen sind sowohl in der Produktionshalle als auch im Labor vorgenommen worden. Bei einem Wannengrund-

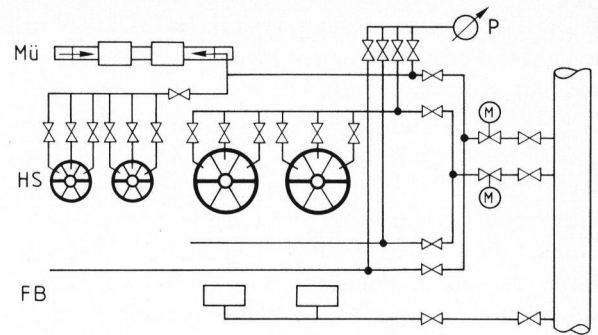


Bild 12. Prinzipielle Darstellung des Versuchsaufbaus zur Untersuchung der Formenaxialkühlung auf einer IS-Maschine mit Doppelformausrüstung.

geräusch von 97 dB(A) (die Produktionsmaschinen bringen dann keinen Beitrag) wurde bei einer mit Radialkühlung betriebenen IS-Maschine ein Geräuschpegel von 99 bis 102 dB(A) gemessen. Der Abstand der Meßstelle von der Maschinenbegrenzung betrug 1 m. Bei abgeschalteter Kühlung wurde ein Geräuschpegel an der laufenden Maschine von 97 bis 99 dB(A) gemessen. An einer mit der Axialkühlung betriebenen Maschine wurde derselbe Schallpegel sowohl bei eingeschalteter als auch abgeschalteter Kühlung gemessen. Eine Messung unter Laborbedingungen an einer Doppelformanordnung, bestehend aus zwei Vorformen und zwei Fertigformen, erfolgte bei voller Beaufschlagung des Systems mit Kühlluft von 500 daPa. Der Abstand der Meßeinrichtung von der Stationsmitte betrug 2 m; das entspricht dem Abstand bei der Messung in der Wanne. Der ermittelte Lärmpegel lag unter 83,5 dB(A). Der Druck betrug vor Eintritt in die Form zwischen 350 und 450 daPa.

Ein Grund für die starke Abnahme der Geräuschentwicklung liegt in der Art des Luftaustritts aus der Form. Die durch enge Bohrungen geleitete Kühlluft verläßt das Werkzeug in Form vieler kurzer Freistrahlen. Diese treffen unmittelbar nach dem Austritt kaum auf Störkörper. Störkörper im Freistrahle können bekanntlich allein die Schallabstrahlung um 10 dB(A) erhöhen. Die Radialkühlung ist ein klassischer Fall für das Vorhandensein extrem vieler Störkörper in einem Bündel von Freistrahlen. Unter Einbeziehung von Veröffentlichungen und Diskussionsbeiträgen zahlreicher Fachauschusssitzungen läßt sich eine Wertung der Lärmerzeugung durch verschiedene Kühlungsarten wie folgt vornehmen:

- Die Radialkühlung mit feststehenden Kühlaufbauten verursacht eine Geräuschentwicklung von 99 bis 102 dB(A).
- Die Oberflächenkühlung mit integrierter Kühlluftführung durch die Formenhalter, typisch für AIS-Maschinen, verursacht eine solche von etwa 96 dB(A).
- Die eingebaute Kühlung der Roirant S-10-111-Maschine weist – wahrscheinlich durch den Einsatz von zusätzlich verwendeter Preßluft – eine Geräuschentwicklung von mehr als 105 dB(A) auf.

d) Die Formenaxialkühlung, typisch ist die Durchströmung der Formenwand, verursacht eine Geräuschentwicklung von etwa 83 dB(A).

Der Leistungsaufwand für die Kühlung der Formen einer 8-Stationen-IS-Maschine, die im Enghals-Preß-Blas-Doppelformverfahren eine 150 g schwere Bierflasche herstellt, wurde sowohl für die klassische Radial- als auch für die neue Axialkühlung ermittelt. Gemessen wurde der Kühlluftaufwand für die Formenkühlung ohne Berücksichtigung der Flaschenkühlung durch die Absatzplatten. Für die mit Radialkühlung ausgerüstete Maschine wurde ein Bedarf von 21 000 m³ Luft (im Normzustand)/h ermittelt. Der statische Druck der Kühlluft vor der Maschine betrug 600 daPa. Bei Einsatz

der Formenaxialkühlung wurden 500 m³ Luft (im Normzustand)/h gemessen, der statische Druck der Kühlluft vor der Maschine betrug 500 daPa.

Für die Erzeugung dieser Kühlluftmengen werden unter Einschaltung einer üblichen Sicherheit Gebläseleistungen von 90 bzw. 15 kW benötigt.

4. Versuch einer Bewertung

Mit Tabelle 1 soll versucht werden, die untersuchten und diskutierten Kühlungssysteme in knapper Form einander gegenüber zu stellen und miteinander vergleichbar zu machen. Die wichtigsten Kriterien sind sicherlich die Kühlungswirkung, die Möglichkeit der notwendigen ört-

Tabelle 1. Gegenüberstellung verschiedener Kühlsysteme

Kühlungsart	Kühlungs- wirkung	Dosierbarkeit in Richtung		Geräusch- entwicklung in dB (A)	Betriebs- kosten- vergleich in % ²)	Aufbau des Systems	Besonderes
		Umfang	Achse				
WK/D p _s ≈ 1	+	+	0	+ gering	10	aufwendig	praktisch keine Regelungsmöglichkeit, Kühlmittel heißes Wasser
WK/D p _s ≫ 1	+	+	0	+ gering	10	sehr aufwendig	Formenwechsel problematisch, Kühlmittel heißes Druckwasser
WK/V beweglich	+	0	+	+ gering	10	sehr aufwendig	Korrosionsgefahr für Maschine
WK/V fest	+	—	0	+ gering	10	einfach	Korrosionsgefahr für Maschine
LK/ax. Oberfläche	—	0	—	— > 95	> 100	aufwendig	wenig erprobt, LK/ax. Durchströmung ist in allen Punkten überlegen.
LK/int. Oberfläche	0	0	0	— 96 bis > 105	> 100	sehr aufwendig	schwierige behälterabhängige Anpassung des Düsenschemas
LK/ax. Durchströmung	+	+	0	0 < 90	< 30	aufwendig	feinfühlig, exakt wiederholbare Einstellungen möglich
LK/rad. Oberfläche	—	0	0	— 100 bis 105	100	sehr einfach	Standardkühlung, Methode ausgereift
WK/V Stempel	— ¹⁾	+	0	+ gering	< 1 ³⁾	einfach	Mitteltemperatur-Wärmerohr-technologie nicht ausgereift
LK Stempel	0	+	+	0 < 90	100 ³⁾	einfach	Standardkühlung, Methode ausgereift

Erläuterungen:

WK/D p_s ≈ 1: Durchflußkühlung, Systemdruck etwa 1 bar

WK/D p_s ≫ 1: Durchflußkühlung, Systemdruck ≫ 1 bar

WK/V beweglich: Sprühkühlung, mitbewegtes Düsensystem

WK/V fest: Sprühkühlung, ortsfestes Düsensystem

LK/ax. Oberfläche: Luftkühlung, axiale Anströmung der Formenoberfläche

LK/int. Oberfläche: Luftkühlung, gemischte Anströmung der Formenoberfläche

LK/ax. Durchströmung: Luftkühlung, axiale Durchströmung der Formenwand

LK/rad. Oberfläche: Luftkühlung, radiale Anströmung der Formenoberfläche

WK/V Stempel: Stempelwasserkühlung mit integriertem Wärmerohr

LK Stempel: Stempel-Luftkühlung mit Preßluft

+: gut, unproblematisch

0: ausreichend, problematisch

—: nicht ausreichend, grundsätzlich problematisch

¹⁾ mit integriertem Wärmerohr

²⁾ Energieaufwand der Radialkühlung mit 100 % bewertet

³⁾ Energieaufwand der Stempel-Druckluftkühlung mit 100 % bewertet

lichen Dosierung des Kühlungsmediums, die Geräuschentwicklung, die Einfachheit oder Kompliziertheit des Aufbaus und nicht zuletzt die Höhe der Betriebskosten.

Die Radialkühlung zeichnet sich durch einen relativ unkomplizierten Aufbau und durch befriedigende Regelungsmöglichkeiten aus. Die gezielte örtliche Dosierung ist unbefriedigend, die Wirkung für Hochleistungsmaschinen nicht ausreichend. Sie verursacht hohe Betriebskosten und ist entschieden zu laut.

Die integrierte Kühlung und das System „vom eingebauten Typ“ zeichnen sich durch erhöhte Wirksamkeit aus. Die Regelungsmöglichkeiten sind ausreichend, jedoch ist die örtliche Dosierbarkeit problematisch und grenzt die Flexibilität der so ausgerüsteten Maschinen ein. Die Betriebskosten sind sehr hoch. Die Geräuschentwicklung ist ebenfalls entschieden zu hoch.

Die Formenaxialkühlung mit der Durchströmung der Formenwandungen weist einen hohen Wirkungsgrad und befriedigende Regelungsmöglichkeiten auf, der Aufbau ist jedoch aufwendiger als der der klassischen Radialkühlung. Die Wirtschaftlichkeit ist unter den Luftkühlungen mit Abstand die beste. Der Betrieb der Formenaxialkühlung ist relativ unproblematisch. Ihr Vorteil liegt nicht zuletzt in der Möglichkeit, reprodu-

zierbare Einstellungen nach exakten Messungen vornehmen zu können. Die Geräuschentwicklung von etwa 83 bis 84 dB(A) ist relativ gut, absolut jedoch zu hoch, läßt sich aber wahrscheinlich noch senken. Die Wirtschaftlichkeit — gegeben durch den Luftverbrauch — kann durch konstruktive Maßnahmen an den Formen sicherlich auch noch weiter verbessert werden.

Kurz- und mittelfristig bietet sich die Kühlung von Formen mit Luft sicherlich für optimale Lösungen an. Langfristig wird man eine Wasserkühlung nicht aus den Augen verlieren dürfen. Die gute bis sehr gute Wirkung, die fehlende Geräuschentwicklung und die sehr gute potentielle Wirtschaftlichkeit sprechen für sich. Für die Verdampfungskühlung spricht ihre sehr gute örtliche Dosierbarkeit, für die Durchflußkühlung die theoretisch mögliche Energierückgewinnung, wenn sie in einem geschlossenen Kreislauf arbeitet. Die Verdampfungsmechanismen sowohl bei der offenen Verdampfungskühlung als auch bei der Durchlaufkühlung müssen noch ausreichend erforscht werden, um sichere Dimensionierungen der Systeme zu ermöglichen. Die zur Zeit noch sehr aufwendigen apparativen Aufbauten und die erkannten Korrosionsprobleme in den Maschinen lassen sich mit durchschnittlichen Ingenieurmitteln sicherlich befriedigend lösen.

5. Literatur

- [1] Christopher, E. C. und Murialdo, G.: A novel forced convection mould cooling system. *Glass* **54** (1977) S. 305, 307, 308, 310, 311. [Ref. *Glastechn. Ber.* **52** (1979) Nr. 2, 79R0331.]
- [2] Costa, P.: Untersuchung der thermischen und geometrischen Kontaktverhältnisse zwischen Glas und Metall bei der Formgebung heißen, zähflüssigen Glases. *Glastechn. Ber.* **45** (1972) S. 277–287.
- [3] Dascotte, A.: Luftkühlung von Hohlglasformen — Vergleich zwischen Horizontal- und Vertikalkühlung bei der neuen Roirant S 10-111-mm-Maschine. *Glastechn. Ber.* **52** (1979) Nr. 5, S. 123–124.
- [4] Fellows, C. J. und Shaw, F.: A laboratory investigation of glass to mould heat transfer during pressing. *Glass Technol.* **19** (1978) S. 4–9. [Ref. *Glastechn. Ber.* **51** (1978) 78R0963.]
- [5] Heinz, F.: Erfahrungen mit dem Parallelöffnungsmechanismus von Glasformen. Vortrag v. d. Fachausschuß IV d. DGG am 27. April 1979 in Düsseldorf. [Ref. *Glastechn. Ber.* **52** (1979) Nr. 8, 79R1842.]
- [6] Schubert, K.-P.: Wärmerohre für den Einsatz in der Glasindustrie. *CZ-Chemie-Techn.* **3** (1974) S. 5-8.
- [7] Schumacher, R.: Anwendung eines Wärmetauschermodells auf Preßstempel. *Glastechn. Ber.* **53** (1980) Nr. 11, S. 291–299
- [8] Trier, W. und Straub, F.: Wärmeabgabe des Glases in der Vorform. *Glastechn. Ber.* **36** S. 253–258. 80R2038