

# Kältetechnik in der Kunststoffverarbeitung

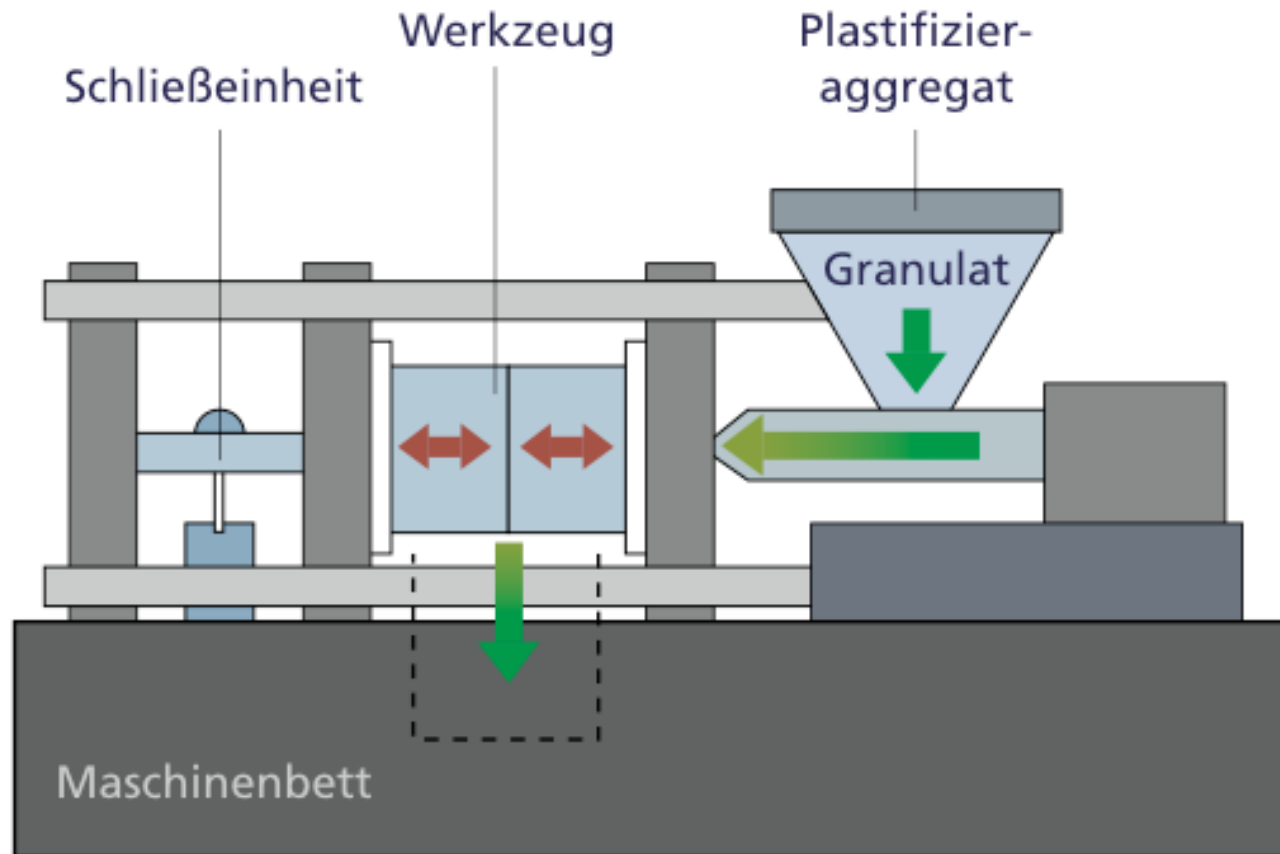
Vortrag von Dipl. Ing. Klaus Reisner  
Deutsche Kälte- und Klimatagung  
vom 22. – 24. Nov. 2017



## Einsatzfelder für Kunststoffverarbeitungsmaschinen

- ① **Extrusionsanlagen**, auf denen langezogene Teile wie Rohre, Fußleisten u. a. produziert werden.
- ② **Blasanlagen**, auf denen Kunststoffschläuche hergestellt werden, die dann im warmen Zustand innerhalb einer Form aufgeblasen werden, z. B. zu Flaschen, Kanistern und andere Hohlformen wie z. B. auch Kinderschaukelsitze.
- ③ **Spritzgießmaschinen**, mit denen wir uns hier besonders beschäftigen.

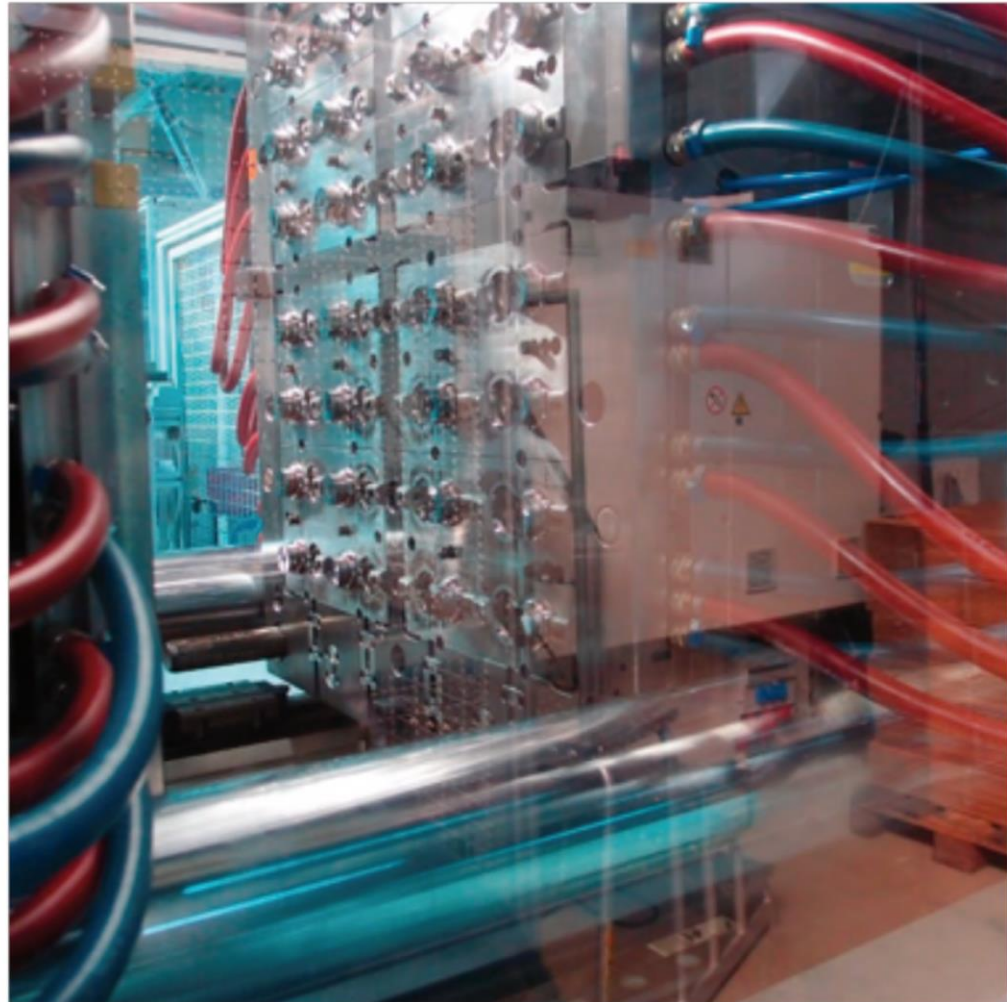
## Prinzipdarstellung einer Spritzgießmaschine



# Spritzgießmaschine



## Produktionsablauf



Film ab



## **Geschwindigkeit:**

Die Maschine schafft in 10 Sekunden einen Eimer mit 300 Gramm Gewicht. Der Betreiber sagt zum Techniker;

„Besorge mir  $\frac{1}{2}$  Sekunde.“

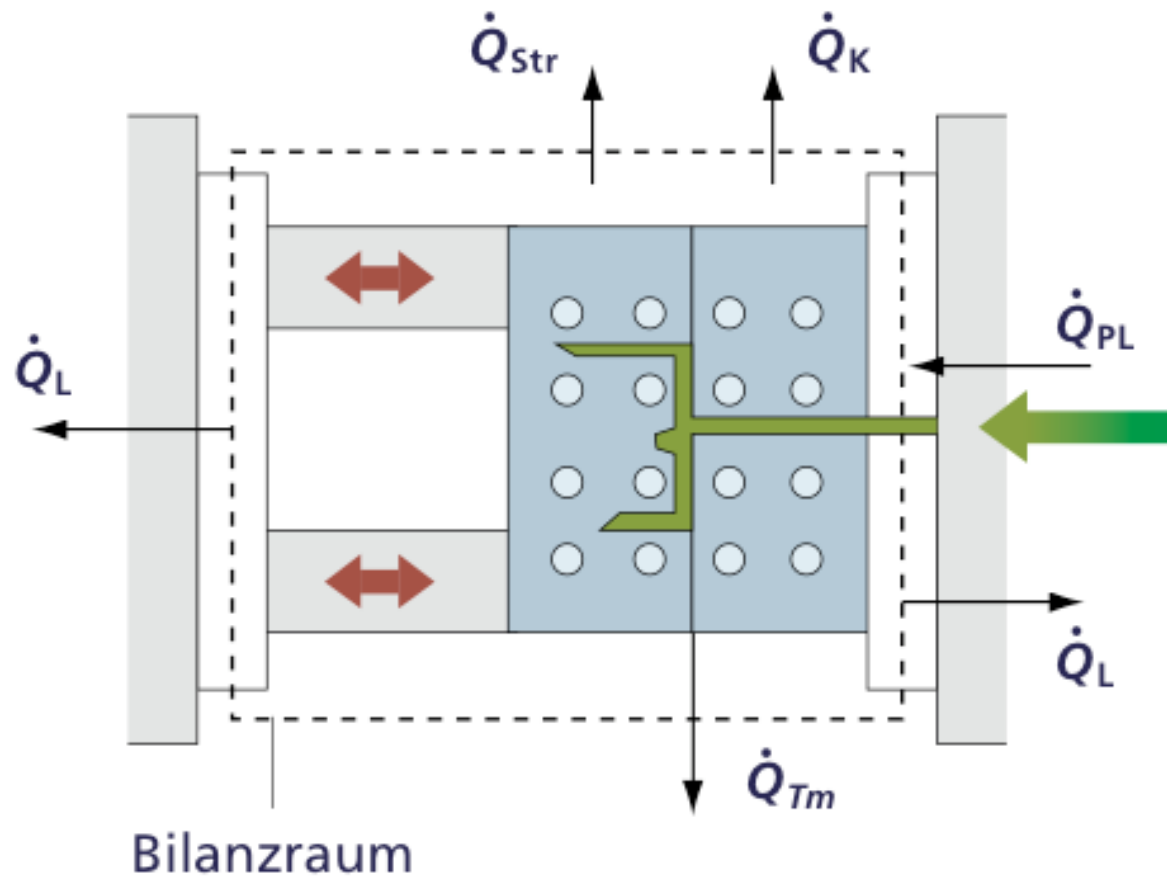
Das sind in 1 Minute = 3 Sekunden, in einer Stunde dann 180 Sekunden

Bei Betriebsstunden von 7 000 h pro Jahr werden daraus  $7\ 000 * 180 =$

1.260.000 Sekunden geteilt / 9,5 Sekunden pro Eimer

Daraus werden also 132 000 Eimer pro Jahr mehr auf nur einer Maschine

# Prinzipbild für ein Werkzeug (Spritzgießform)



## Wärmeströme, die zu bilanzieren sind:

- ① **Wärme aus dem geschmolzenen Kunststoff**
- ② **Wärmeabgabe durch Konvektion**
- ③ **Wärmestrom nach außen durch Wärmeleitung**
- ④ **Wärme aus Heißkanälen, die zur speziellen Verformung oft in die Werkzeuge eingebaut werden**



## Der Kältebedarf

**Rechenaufgabe:** Kältebedarfsrechnung auf den pro Zeiteinheit durchgegebenen Kunststoff:

- **Kunststoff-Massendurchsatz  $m_K$  in kg/h**

Da Kunststoff sehr eigenartige thermische Verhaltensweisen hat, kann die übliche Gleichung

$$\dot{Q}_{0K} = m_K \cdot c_K \cdot \Delta T$$

$c_K$  = spez. Wärmekapazität

$\Delta T$  = Temperaturdifferenz vor / nach Abkühlung

nicht angewendet werden!

**Warum ist das so ?**

## Spezifische Wärmekapazität ( $c_K$ )

- Die **spezifische Wärmekapazität** von Kunststoff ( $c_K$  in  $J/kg \cdot K$ ), ändert sich **erheblich** mit der Temperatur!
- Bei Kunststoff gibt es auch unterschiedliche Erstarrungspunkte, die recht nahe beieinander liegen, also keine konstanten Werte wie z. B. bei Wasser.

## Spezifische Wärmekapazität / Enthalpie

- Die **spezifische Wärmekapazität** von Kunststoff ( $c_K$  in  $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ), ändert sich **erheblich** mit der Temperatur!
- Ein gutes Ergebnis kann nur über die Enthalpie (bzw. die Enthalpiedifferenz ( $\Delta h = h_1 - h_2$ ) berechnet werden, wobei hier die Enthalpie für *Polypropylen* genommen wird, bei einer Schmelztemperatur von  $h_2 = 230 \text{ °C}$  und einer Entnahmetemperatur von  $h_1 = 40 \text{ °C}$ :

$$h_{1230} - h_{240} = 580 \text{ kJ/kg}$$

# Wärmeübertragung

## Wärmeleitung

Die Wärmeleitung wird durch das Material geleitet nach dieser Gesetzmäßigkeit:

$$\dot{Q}_L = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot (T_{A1} - T_{A2})$$

$\dot{Q}_L$  = Wärmestrom (in kJ/h)

$\lambda$  = Wärmeleitkoeffizient (J/m · s · K)

$\delta$  = Wandstärke (in m)

$A$  = Wandoberfläche (in m<sup>2</sup>)

$T_{A1}$  = Oberflächentemperatur innen (in K)

$T_{A2}$  = Oberflächentemperatur außen (in K)

## Wärmeleitung

$$\dot{Q}_L = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot (T_{A1} - T_{A2})$$

Die Gleichung sagt:

- a) Die Wärmeleitfähigkeit ändert sich mit der Wandstärke.  
Je dünner die Wand ist, desto günstiger ist der Wärmedurchgang;
- b) mit der Oberfläche, die sich aber nur wenig beeinflussen lässt;
- c) mit der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Dabei wird die Temperatur auf der Kunststoffseite nicht zu beeinflussen sein, wohl aber die Kaltwassertemperatur.



Die Wärmeleitung lässt sich stetig verbessern, indem man die Wand zum Material- also zum Produkt besonders dünn gestaltet. Man nennt das konturnahe Kühlung. Der Effekt ist ausgezeichnet, aber die Kühlkanäle werden immer dünner und man kann sehr schlecht reparieren, besonders wenn die Kanäle verstopfen.

Die weitere Maßnahme ist, das Material mit Beryllium zu legieren. Dann erhöht sich der Wärmeleitwert.

Aluminium hat sich wegen der mangelhaften Stabilität nicht so gut bewährt.

## Wärmeübergang (1)

Der Wärmeübergang (auch Konvektion genannt) ist eine Wärmeübertragung an der Kontaktfläche zwischen Medien im Wärmetauscher (z. B. die dünne Wandung gegen Kaltwasser).

$$\dot{Q}_W = \alpha \cdot A \cdot (T_W - T_F)$$

$A$  = Wandoberfläche (in  $m^2$ )

$\alpha$  = Wärmeübergangskoeffizient (in  $W/m^2 \cdot K$ )

Der Wärmeübergang wird maßgeblich bestimmt durch sehr komplexe Strömungsverhältnisse.

## Wärmeübergang (2)

### Strömungsverhältnisse

Der Wärmeübergang kann noch an der Oberfläche der Kühlkanäle mit dem Wasser beeinflusst werden, nicht jedoch auf der Produktseite.

Der Wärmeübergang bestimmt sich durch die Reynoldszahl:

$$\text{Re} = w \cdot \frac{d}{\nu}$$

$w$  = Strömungsgeschwindigkeit (in m/s)

$\text{Re}$  = Reynoldszahl

Sie stellt den Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit, Viskosität und dem Rohrdurchmesser dar.

Anders ausgedrückt, beschreibt sie den *Proportionalitätsfaktor* zwischen dem *Druckverlust* und dem *Staudruck*.



Man versucht, den Wärmeübergang durch immer mehr Wasser zu verbessern

und es gibt Anlagen, da ist die Temperaturdifferenz zwischen Wassereintritt- und Austritt 1 K.

Das kostet natürlich sehr viel Energie.

Durch die Berechnung der Werkzeuge mittels der bekannten Gesetze kann man aber oft mit geringeren Strömungen auskommen.

Auch das Einbringen von Wendeln oder anderen Störkörpern in die Bohrung verbessert die Turbulenzen erheblich.

## Wärmeübergang (3)

### Strömungsgeschwindigkeit

- Ein hoher Wasserdurchsatz bewirkt eine hohe Pumpenleistung (das bewirkt einen deutlich höheren Energieaufwand sowie einen höheren Korrosionsabtrag).
- Der gesamte Wärmestrom — nur auf den Kunststoff bezogen — ergibt sich aus der Summe von:

$$\dot{Q}_{0\text{ges}} = \dot{Q}_{0L} + \dot{Q}_{0W}$$

Auf diese Weise läßt sich eine annähernde Berechnung der Werkzeuge durchführen

## Praxisbeispiel zur Berechnung einer Kaltwasserversorgung einer Produktionsstätte mit SGM

In der Spritzerei arbeiten 5 Werkzeuge mit dem Material Polyethylen, welches bei 230 °C aufgeschmolzen wird und mit 40 °C entnommen wird. Produziert werden Eimer mit einer Zykluszeit von 10 Sekunden je Werkzeug/Form, also 360 Eimer pro Stunde, je Eimer 300 Gramm.

Damit beträgt der Kunststoffmassendurchsatz pro Werkzeug 108 kg/pro Std.

Die aus dem Kunststoff abzuführende Wärme ist also aus der Enthalpiedifferenz ( $\Delta h$ ) mit 580 kJ/kg

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{ges}} &= 580 \text{ kJ/kg} \cdot 108 \text{ kg/h} \\ &= 62.600 \text{ kJ/h} = 17 \text{ kW Kälteleistung pro Werkzeug}\end{aligned}$$

Umgerechnet auf 1 kg dieses Kunststoffes sind das  
17.000 kJ/kg / 108 kg/h = 157 Wh/kg = 565 kJ/kg

**Bei 5 Maschinen ergeben sich 85 kW erforderliche Kälteleistung**

## Verlustleistungen

Die vorangegangene Berechnung berücksichtigt nicht die erheblichen (verborgenen) Verlustleistungen in der Anlage

- Ein Großteil des Pumpenantriebes wird in Wärme umgesetzt
- Die Wärmeeinstrahlungen in die Rohrleitungen
- Die Einstrahlungsverluste am Werkzeug
- Die Beheizungen im Werkzeug zur Verbesserung des Fließverhaltens
- Den Wärmeeintritt aus der warmen Fabrikhallenluft

Folglich ist der **Kältebedarf** einer solchen Anlage **deutlich höher** anzusetzen!



## Kaltwasserstrom / Strömungsberechnung

- Bei der Betrachtung einer solchen Gesamtanlage ist ein sehr niedrige  $\Delta T$  des Wassers zwischen Ein- und Austritt anzunehmen. Dabei ergibt sich eine Strömung von

$$\dot{m}_{\text{Wasser}} = \frac{\dot{Q}_0}{(c_w \cdot \Delta T)}$$

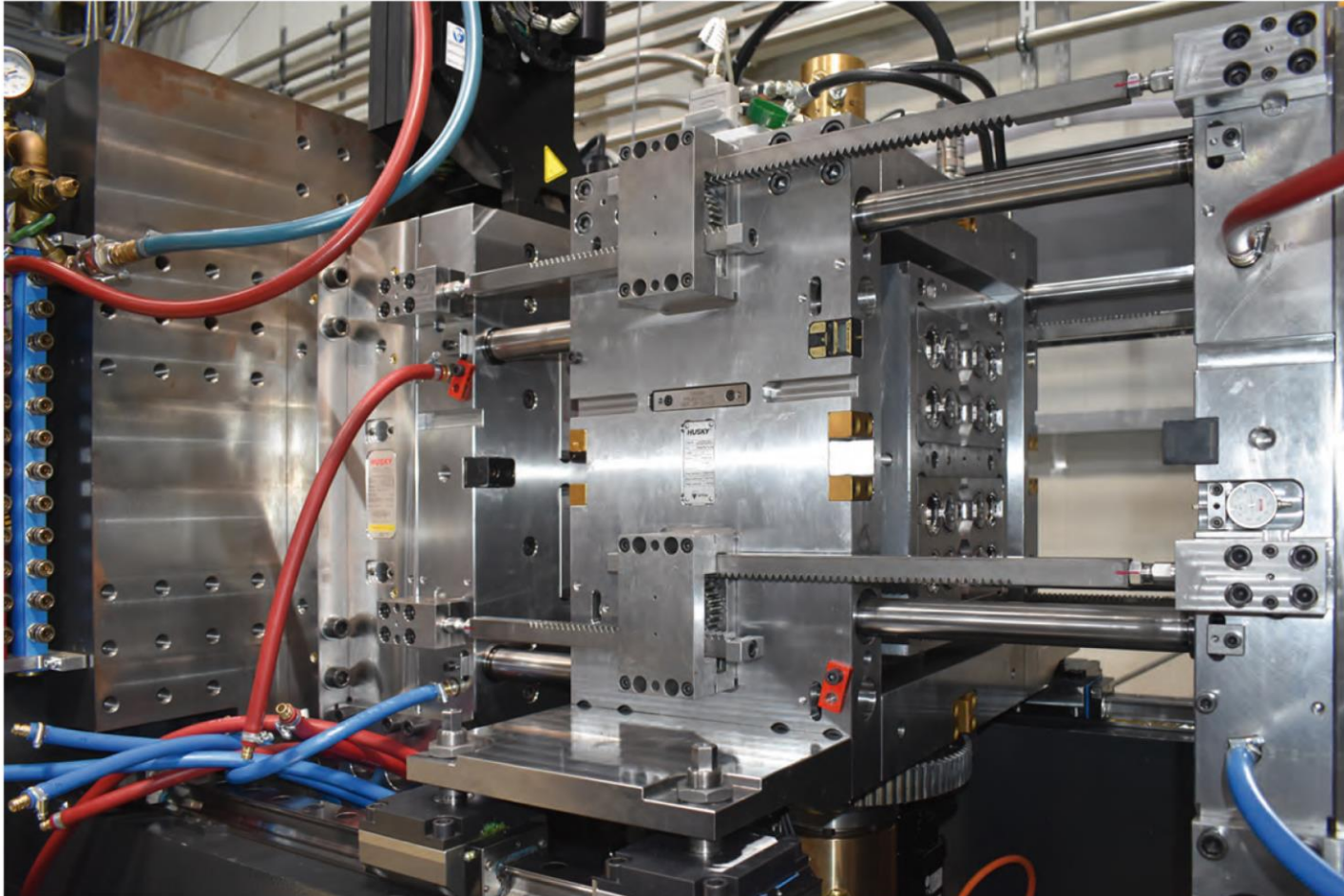
Wir setzen das  $\Delta T$  mit 1,5 K an und erhalten:

$$\frac{\frac{85.000 \text{ W} \cdot 3,6}{4,19 \text{ kJ/kgK}}}{1,5 \text{ K}} = 65,9 \cdot 10^3 \text{ kg/h}$$

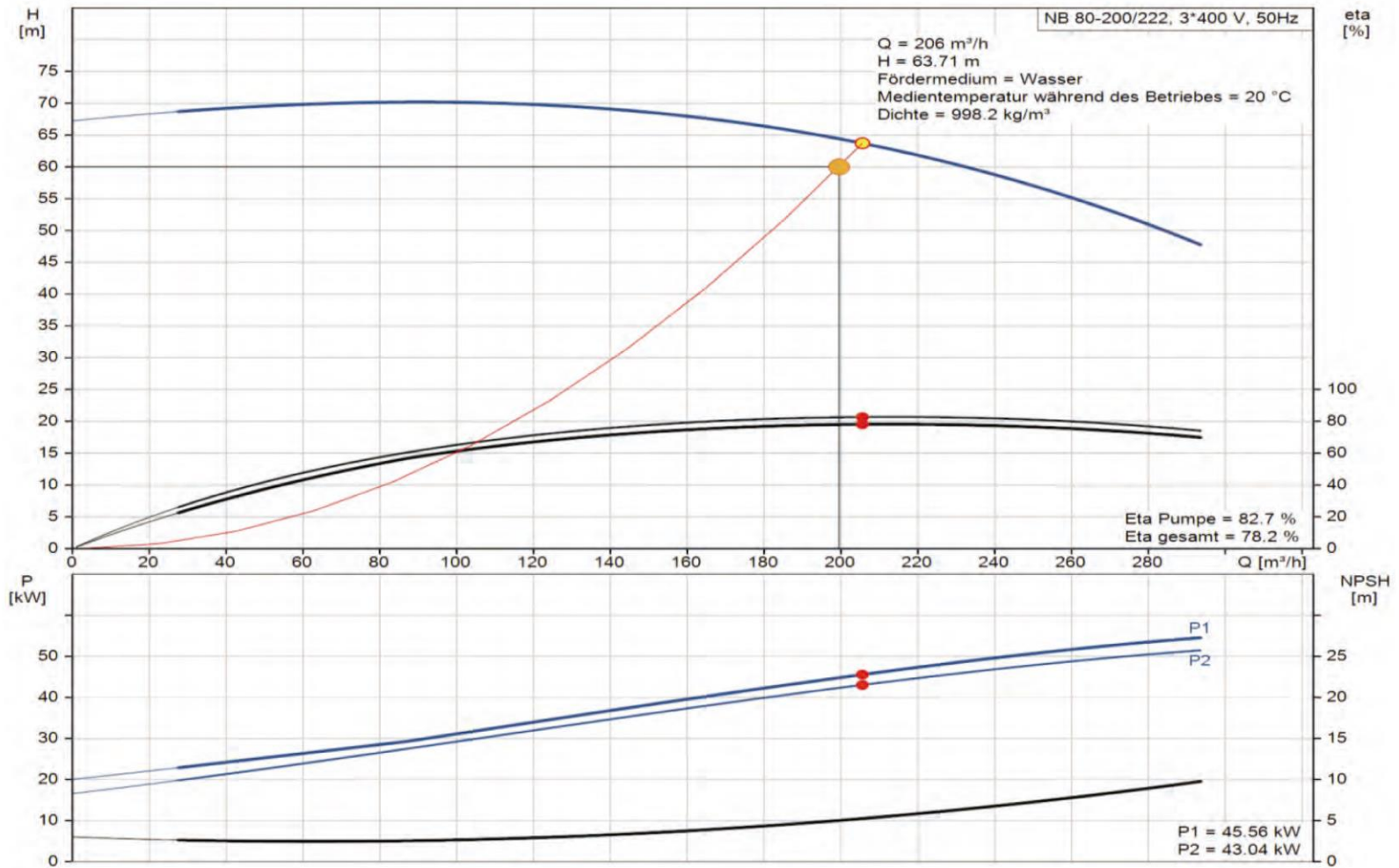
$$= 65,9 \cdot \text{m}^3/\text{h}$$

Bei den Kanälen ist ein hoher Vordruck von 5 bis 6 bar erforderlich

## Werkzeug (Spritzgießform)



# Pumpenauswahl / Kennlinie



## **Pumpenregelung ja oder nein???**

Das ganze System „lebt von dem Druck, der Druckdifferenz vor/ hinter dem Werkzeug. Diese muss immer erhalten bleiben, sonst funktioniert die Strömung nicht.

Wenn die Produktion weniger belastet ist, braucht man trotzdem diesen Druck. Der Wasserstrom wird natürlich geringer. Das aber sorgt schon alleine dafür, dass die Leistungsaufnahme der Pumpe sinkt.

Dieser Hinweis soll dazu führen, die teure Investition vielleicht einzusparen.

Unentbehrlich ist lediglich ein Sanftanlauf



## Kältemaschine

- Beim Aufbau der Kältemaschine ist eine notwendige und sinnvolle Ausstattung zu beachten.

Dies gilt insbesondere für:

- Wärmetauscher
- Rohre
- Verdampfer

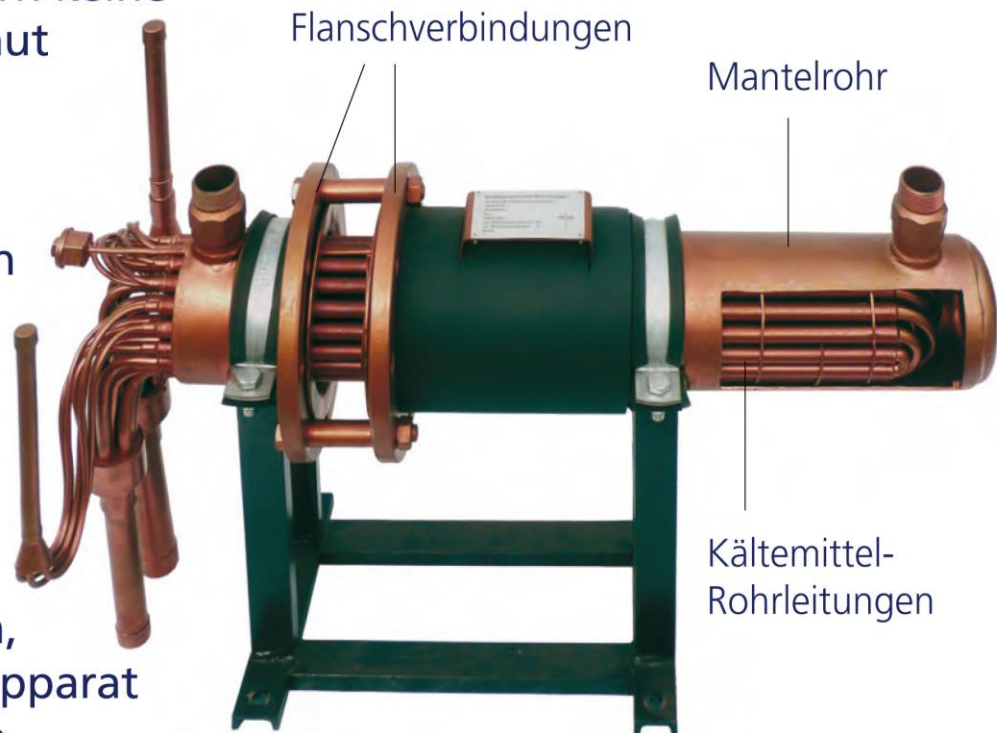
- Zur Schonung der Kältemaschine ist darauf zu achten, dass keine **Verdampfer** eingesetzt werden, bei denen die **Rohre** mit dünnen Wandschichten durch zusätzliche **Plattenwärmeaustauscher** kompensiert werden.
- Diese Wärmeaustauscher erhöhen den Energieverbrauch enorm, da sie Temperaturdifferenzen benötigen um zu funktionieren.



## Verdampfer

Aus energetischen Gründen sollen zum Schutz von Verdampfern keine Wärmeaustauscher eingebaut werden, die aufgrund der erforderlichen Temperaturdifferenzen zu deutlichen energetischen Minderungen führen.

Man muss auf spezielle Konstruktionen ausweichen, wie z. B. einen Bündelrohrapparat mit außenberippten Rohren. (So ein Gerät ist nebenstehend abgebildet)



Wefoto: DK-Kälteanlagen Emsdetten

Etwas Praxis:

Dieser Verdampfer kann mit einem Mantel aus unterschiedlichem Material versehen werden, z.B. Kupfer oder Kunststoff.

Die Rohrwandstärke mit 0,9 mm erlaubt enorme Belastungen. Der Verdampfer kann gut gereinigt werden, was für diesen Einsatzzweck elementar wichtig ist.

Erfreulich auch die Kältemittel- Mehrfach-Einspritzung

Somit sind verlustbringende Zwischen-Wärmeaustauscher, Sekundärkreise etc. nicht notwendig

## Korrosion

Von Korrosion spricht man, wenn sich ein z. B. metallischer Werkstoff in Wasser durch elektrochemische Reaktionen auflöst.

Dadurch können Rohre aus metallischen Werkstoffen zerstört werden.

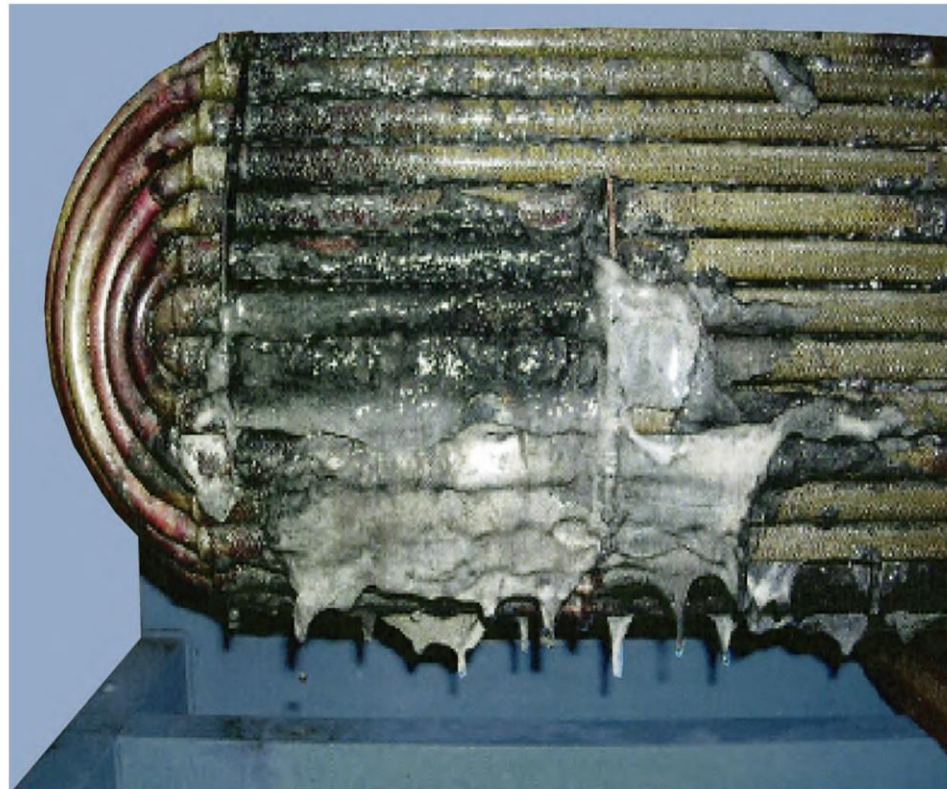
- Durch Korrosionsprodukte, wie z. B. Rost, die in den Wasserkreislauf gelangen, entstehen erhebliche Folgeschäden, insbesondere in den Werkzeugen
- Weil Kunststoff keinen Strom leitet, wird die elektrochemische Spannungsreihe unterbrochen.  
In Kreisläufen die aus unterschiedlichen Materialien bestehen wird dadurch die wesentliche Ursache von Korrosion eliminiert.



## Verschleimter Verdampfer

Verschmutzungen durch Korrosion und auch solche die durch Bakterien entstehen, wie dies das nebenstehende Bild zeigt, sind für eine Kälteanlage und insbesondere für Werkzeuge mit konturnaher Kühlung nicht hinzunehmen.

Deshalb benötigen solche Anlagen eine vernünftige Wasserkonditionierung mit Korrosionsschutzmitteln und Bioziden.



## Wirtschaftlichkeit

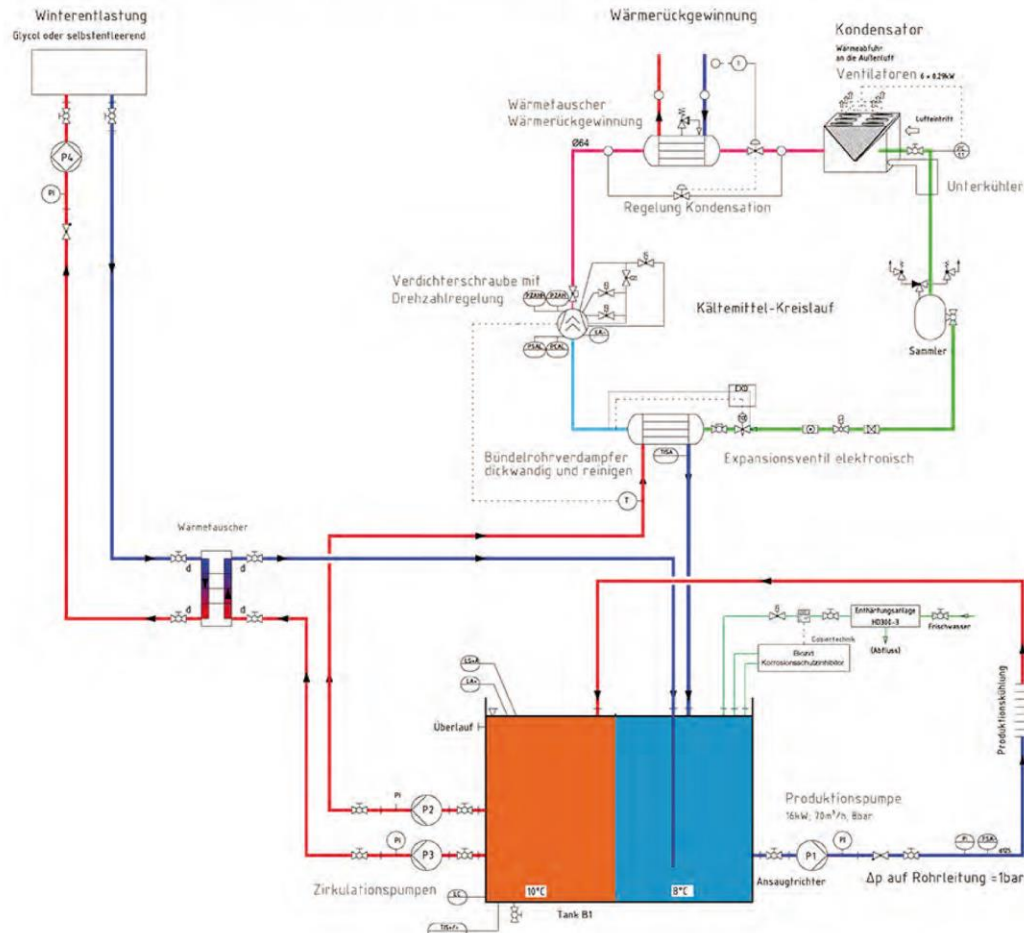
- Eine optimale Kondensation,
  - eine so hoch wie mögliche Verdampfungstemperatur,
  - eine hohe Strömungsgeschwindigkeit,
  - ein angepasster Werkzeugbau, der die Kaltwasserströme und -temperaturen positiv beeinflusst,
- sind die Parameter für hohe Wirtschaftlichkeit durch effizientes Energiesparen

Mit dem ergänzenden Einsatz von z. B. der „freien Kühlung“ zur Absenkung der Kondensationstemperatur adäquat zur Außenlufttemperatur (bei luftgekühlten Kondensatoren), kann die Wirtschaftlichkeit noch weiter erhöht werden.



# Fließschema einer Kälteanlage

◀ Wenn Winterentlastung, keine Wärmerückgewinnung ▶



**Legende:**

- ⊗ Absperrklappe m. Handbetätigung
- ⊗ Absperrarmatur m. Elektronengetriebe
- ⊗ Absperrdurchgangsventil nicht absperrbar
- ⊗ Kugelhahn m. Schließkegels
- ⊗ elektr. Expansionsventil
- ⊗ Schauglas m. Indikator
- ⊗ Filtertrichter
- ⊗ Absperrarmatur m. Elektroantrieb
- ⊗ Absperrarmatur m. Membrantrieb
- ⊗ Absperrarmatur m. Pneumatiktrieb
- ⊗ 3-Wege-Ventil
- ⊗ Strömungswächter
- ⊗ Druckwächter
- ⊗ Frequenzrichter
- ⊗ Druckanzeige Manometer
- ⊗ Überlaufmelder alarmgebend
- ⊗ niedrig Niveaumelder alarmgebend
- ⊗ Füllstandsregelung
- ⊗ Überlaufmelder schallend
- ⊗ niedrig Niveaumelder schallend u. alarmgebend
- ⊗ Niedrigtemperaturfühler-Anzeige schallend, alarmgebend
- ⊗ Hoch- u. Niedrigtemperaturregelung schallend u. alarmgebend
- ⊗ Schraubenverdichter
- ⊗ Pumpe
- ⊗ Plattenwärmetauscher
- ⊗ Sicherheitsventil
- ⊗ Überdruckventil
- ⊗ 3-Wegeventil m. gesperrtem Anschluss
- ⊗ Hochtemperaturregelung schaltend
- ⊗ Hochtemperaturregelung schaltend u. alarmgebend
- ⊗ Temperaturfühler Über-/Untertemperatur alarmgebend
- ⊗ Temperaturregelung
- ⊗ Temperaturkontrolle
- ⊗ Temperaturanzeige
- ⊗ Temperaturfühler-Anzeige schallend, alarmgebend
- ⊗ Druckregelung
- ⊗ Sicherheitsüberdruck-Schalter
- ⊗ Überdruckschalter
- ⊗ Unterdruckschalter
- ⊗ Niederdrucksensor
- ⊗ Temperaturfühler

DT Wasser = 1,56 bis 2K  
 Vordruck an Pumpe min 5bar  
 Druckverlust auf Rohrleitung = 1bar akzeptiert  
 Strömungsgeschwindigkeit im Rohr = 2m/s  
 Tank und Rohr aus Kunststoff  
 Pumpenleistung  $Q' / 15$   
 Kältearbeit pro kg Kunststoff = 300Wh/ 1080kJ/kg  
 Rohrquerschnitt mit 2m/s berechnen  
 $V_w/w$  mit  $V$  in  $m^2/s$   
 und  $w$  in  $m/s$



## Wassertankanlage





## **System offen oder geschlossen???**

Die Kaltwassersysteme werden atmosphärisch offen aufgebaut. Der freie Rücklauf ist- abgesehen von dem Staudruck im Rohr, gewährleistet. Ebenso ist die Druckdifferenz für die starke Strömung gewährleistet.

Der Wasserkreis ist zugänglich und kontrollierbar.

Bei komplizierten Wassernetzen ist die Verteilung eindeutig gegeben.

Wasserkonditionierung, Erweiterungen, Überwachung des Wasserstandes etc. lässt sich so leicht beherrschen.

Die Bauweise in Kunststoff ist sehr praktisch, sofort isolierend und korrosionsfrei

# Kältemaschine



Hersteller  
*compact*



# Pumpenanlage



# Praxiswerte

$\delta T$  Wasser = 1,5 bis 2K

Vordruck an Pumpe min 5 bar

Druckverlust auf Rohrleitung 1 bar akzeptiert

Strömungsgeschwindigkeit im Rohr 2 mtr/Sek

Tank und Rohr aus Kunststoff

Pumpenleistung =  $Q_{0' / 1,5}$

Kältearbeit pro kg Kunststoff = 300 Wh /kg  
/1080 kJ/kg

Rohrquerschnitt mit 2 m/Sek berechnen  $V_w / w$   
mit  $V$  in m<sup>3</sup>/sek und  $w$  in m/s

nach der Durchflussgleichung und dann mit  
Bernoulli weiter