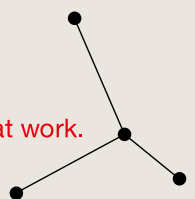


$$\dot{m} \left[\frac{kg}{min} \right] = 14,34 \cdot \frac{\dot{Q} \left[\frac{kg}{min} \right]}{\Delta T} \quad \dot{m} \left[\frac{kg}{min} \right] = \frac{V [kg]}{T_{\text{Laufzeit}} [min]}$$



Richtige Auslegung des Pufferspeichers

für Kaltwassersysteme und Wärmepumpen



Richtige Auslegung des Pufferspeichers

In vielen Fällen ist der Einsatz eines Pufferspeichers bei einem Kaltwassersatz sinnvoll, um unter anderem die Mindestlaufzeit der Verdichter sicher zu stellen. Für die einfache und schnelle Berechnung der passenden Größe des Speichers wendet Mitsubishi Electric eine einfache Formel an.

Macht ein Pufferspeicher Sinn? Und wenn ja, welches Volumen sollte er haben? Diese zwei Fragen müssen sich Fachplaner und -handwerker bei der Planung von Kaltwassersatzen immer wieder stellen. Die Antwort auf die erste Frage fällt noch relativ leicht, da sie in den meisten Fällen „ja“ lautet. Auf einen Pufferspeicher sollte nur in folgenden Situationen verzichtet werden: bei ausreichend großem Systeminhalt – beispielsweise durch ungewöhnlich lange Rohrleitungen – oder bei einer konstanten Lastabnahme, die größer ist als die Leistung der kleinsten Teillaststufe.

Letztere ist im Bereich der Komfortkühlung allerdings selten gegeben, da besonders in den Übergangszeiten die Lastabnahme durch die Verbraucher sinkt. Infolgedessen fließt ein Großteil des gekühlten Wassers zurück zum Kaltwassersatz, der aufgrund des mangelnden Kühlbedarfs nicht bzw. nur sehr kurz arbeitet. Dadurch kann in solchen Fällen die minimale Laufzeit des Verdichters nicht sichergestellt werden. Ein anderer Aspekt, der bei Entscheidung für das Volumen eines Pufferspeichers wichtig ist, ist die Anzahl der Verdichteranläufe. „Bei einem zu geringen Systeminhalt besteht die Gefahr, dass die Regelung die Stillstandszeiten verlängert, um die Höchstzahl der Verdichteranläufe pro Stunde nicht zu überschreiten bzw. gleichmäßig auf den entsprechenden Zeitraum zu verteilen.“

Die Folge sind starke Schwankungen der Wasseraustrittstemperatur um den Sollwert herum“, erläutert Michael Lechte, Leiter Produktmarketing bei Mitsubishi Electric, Living Environment Systems. Durch die Einbindung eines Pufferspeichers in den Hydraulikkreislauf können diese Probleme vermieden werden. Er erhöht das Wasservolumen und gewährleistet dadurch die Mindestlaufzeit der Verdichter, da die Kühlung der größeren Wassermenge länger dauert. Aufgrund der längeren Betriebszeit reduziert sich wiederum die Anzahl der Verdichteranläufe. Dadurch werden das Blockieren der Verdichter durch die Regelung und sich daraus ergebende Stillstandszeiten verhindert.

Darüber hinaus führt der ausgewogene Verdichterbetrieb zu einer konstanten Wasseraustrittstemperatur, die sehr nahe am Sollwert liegt, und zu einer längeren Lebensdauer. Ein Pufferspeicher ist somit in den meisten Fällen eine sinnvolle Ergänzung des Kaltwassersatzes, zumal er auch als hydraulische Weiche eingesetzt werden kann.

Somit bleibt die Frage nach der Größe des Speichers. Viele Hersteller machen dazu Angaben in den Datenblättern ihrer Systeme oder in der Planungssoftware. Zum Teil werden auch Faustformeln im Sinne von „pro kW Kälteleistung werden X Liter Wasservolumen benötigt“ genutzt. „Aus unserer Sicht sind solche groben Berechnungen problematisch, weil sie zu ungenau sind. Ein zu klein gewählter Pufferspeicher hat einen zu geringen Systeminhalt zur Folge, dies kann zu langen Stillstandszeiten der Verdichter führen. Ein überdimensionierter Pufferspeicher hingegen bedeutet unnötige Investitions- und Betriebskosten. Auch wird die Zeit, in der das Gesamtsystem wieder auf das benötigte Temperaturniveau abgekühlt wird, unnötig verlängert“, so Lechte.

Der Einsatz eines Pufferspeichers stellt sicher, dass die Mindestlaufzeit der Verdichter eines Kaltwassersatzes erreicht wird.



Das Ratinger Unternehmen empfiehlt seinen Kunden daher eine Formel, die schnell und einfach eine genaue Berechnung des benötigten Pufferspeicher-Volumens ermöglicht. Sie basiert auf der Grundgleichung der Thermodynamik, dass das Produkt des Massestroms eines Mediums, seiner spezifischen Wärmekapazität und der Temperaturdifferenz der Wärme- bzw. Kälteenergie entspricht:

$$\dot{Q} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right] = \dot{m} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \cdot c \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \cdot \Delta T [\text{K}]$$

Sie wird mit der Gleichung kombiniert, dass sich der minimale Systeminhalt einer Kälteanlage aus dem Produkt des Massestroms mal der Mindestlaufzeit der Verdichter ergibt:

$$V [\text{kg}] = \dot{m} \left[\frac{\text{kg}}{\text{min}} \right] \cdot T_{\text{Laufzeit}} [\text{min}]$$

Um den Systeminhalt zu errechnen, müssen beide Formeln gleichgesetzt werden. Dazu wird zunächst die erste Gleichung nach \dot{m} umgestellt, und der Faktor 4,19 wird als spezifische Wärmekapazität von Wasser eingesetzt. Wird auch die zweite Gleichung entsprechend umgestellt, so ergeben sich nach Kürzung verschiedener Einheiten folgende Formeln:

$$\dot{m} \left[\frac{\text{kg}}{\text{min}} \right] = 14,34 \cdot \frac{\dot{Q} \left[\frac{\text{kg}}{\text{min}} \right]}{\Delta T [\text{min}]}$$

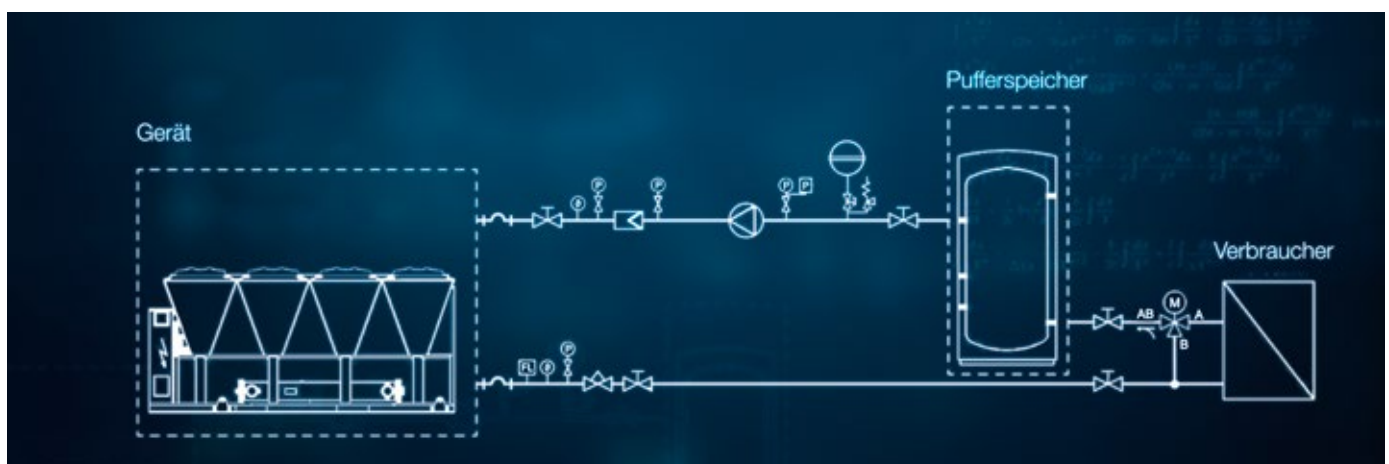
$$\dot{m} \left[\frac{\text{kg}}{\text{min}} \right] = \frac{V [\text{kg}]}{T_{\text{Laufzeit}} [\text{min}]}$$

Durch die Kombination beider Gleichungen, weitere Kürzungen und eine Umstellung der Formel nach V erhält man schließlich die Berechnungsgrundlage, dass der minimale Systeminhalt gleich dem Produkt der Kälteenergie, des Faktors und der Mindestlaufzeit des Verdichters ist, geteilt durch die Schaltdifferenz im Regler:

$$V = \frac{((Q_{\text{Max}} \cdot f_{\text{Teillast}} - Q_{\text{Last}}) \cdot \text{Faktor} \cdot T_{\text{Laufzeit}})}{\Delta T_{\text{Regler}}}$$

Der Faktor entspricht in diesem Fall 14,32. Diese Konstante basiert auf der spezifischen Wärmekapazität von Wasser und ergibt sich aufgrund der Einheitsumwandlungen infolge der Formelumstellung. Die Kälteenergie wird aus dem Produkt der maximalen Geräteleistung Q_{Max} und der minimalen Teillaststufe f_{Teillast} abzüglich der konstanten Lastabnahme im System Q_{Last} berechnet.

- Ein Pufferspeicher vergrößert den Systeminhalt und trägt dadurch unter anderem zu einer konstanten Wasseraustrittstemperatur bei.



Richtige Auslegung des Pufferspeichers

Die Angaben zur maximalen Kälteleistung sowie zur Teillaststufe können dem technischen Datenblatt des Herstellers entnommen werden. Der Wert Q_{Last} entspricht der konstant durch die Verbraucher abgenommenen Kälteleistung. Ist diese nicht vorhanden oder falls keine genauen Angaben bekannt sind, so kann der Wert gleich „0“ gesetzt werden. Die Mindestlaufzeit der Verdichter ist ebenfalls konstant, jedoch typenabhängig: Bei einem Scrollverdichter beträgt sie eine Minute, bei einem Schraubenverdichter mindestens zweieinhalb Minuten.

Der Wert der Schaltdifferenz im Regler wird vom Planer bzw. Anlagenbauer festgelegt, der an dieser Stelle die Möglichkeit hat, die Größe des Pufferspeichers zu beeinflussen: Je größer die maximal erlaubte Schwankung um den Sollwert, desto länger ist die Laufzeit des Verdichters, desto kleiner kann der Speicher gewählt werden. Eine verhältnismäßig hohe Sollwertabweichung ist gerade bei der Komfortklimatisierung nicht so problematisch wie im Bereich der Prozesskühlung. Dies kann dazu führen, dass das gleiche Gerät – je nach Einsatzbereich – mit unterschiedlichen Pufferspeichergrößen kombiniert werden muss. Wer ein besonders exaktes Ergebnis für das Volumen wünscht, kann im Übrigen vom Ergebnis noch den Systeminhalt in den Rohren und Verbrauchern abziehen.

Ein Aspekt, der bei der Berechnung unbedingt beachtet werden sollte, betrifft den Wert der maximalen Kälteleistung. Diese wird oft unter Auslegungsbedingungen angegeben, d. h. bei einer hohen Außentemperatur, bei der in Komfortanwendungen die Lastanforderung nach Norm 100 Prozent beträgt. In diesem Fall wäre gar kein Pufferspeicher nötig, da das Gerät aufgrund der hohen Leistung kontinuierlich arbeitet. Luftgekühlte Kaltwassererzeuger arbeiten jedoch unter Teillastbedingungen effizienter, somit wird die maximale Kälteleistung bei kühleren Temperaturen erreicht. Gerade für den Betrieb unter Teillastbedingungen ist der Pufferspeicher notwendig, um einen Taktbetrieb des Verdichters zu vermeiden. Für genauere Werte ist es daher empfehlenswert, die Leistung bei einer moderaten Außentemperatur wie beispielsweise 20 °C zu wählen. Dementsprechend sollte bei wassergekühlten Geräten die minimale Kühlwasseraustrittstemperatur zur Berechnung der Leistung verwendet werden, und bei Geräten mit externem Verflüssiger die minimale Verflüssigungstemperatur.





Kalkulationsblatt: Mitsubishi Electric hat basierend auf der Formel ein Kalkulationsblatt erstellt, in das wenige Werte zur Berechnung des Pufferspeicher-Volumens eingetragen werden müssen.

Beruhend auf der oben genannten Formel hat Mitsubishi Electric ein Kalkulationsblatt erstellt, das dem Außendienst sowie dem technischen Innendienst zur Verfügung steht. Hier sind nur wenige Werte zur Berechnung des Pufferspeichervolumens einzutragen. Die Angaben zur Anzahl der Verdichter sowie deren Technologie können beispielsweise aus einer Liste gewählt werden.

Die Werte für f_{Teillast} und T_{Laufzeit} werden dann automatisch angepasst. Die Konstante „Faktor“ ist bereits eingetragen, sodass nur noch Werte für Q_{Max} , Q_{Last} und T_{Regler} hinzugefügt werden müssen. Der minimale Systeminhalt wird anschließend den Eingaben entsprechend automatisch berechnet. Auf Wunsch kann noch der Systeminhalt des hydraulischen Kreislaufes vom Ergebnis abgezogen werden, um das nötige Volumen des Pufferspeichers zu erhalten. Zusätzlich berechnet das Kalkulationsblatt die Stillstandszeiten der Verdichter, in denen keine aktive Kühlung stattfindet. Sollte die Stillstandszeit zu lange sein, was besonders bei temperaturkritischen Anwendungen problematisch ist, so kann man diese durch einen entsprechend großen Pufferspeicher verringern.

Natürlich gibt es Aspekte, die in der genannten Formel nicht berücksichtigt werden, wie beispielsweise die Tatsache, dass je nach Einbausituation nicht der gesamte Pufferspeicher durchmischt wird. „Allerdings gibt die vorliegende Berechnung eine Orientierung, die in der Praxis ausreichend genau ist“, erläutert Michael Lechte, Manager Produktmarketing Mitsubishi Electric, Living Environment Systems. Und bei Ergebnissen, zu denen es am Markt keinen Pufferspeicher passender Größe gibt, empfiehlt Lechte die nächstgrößere Ausführung zu wählen: „Mit dieser Lösung ist man auf der sicheren Seite.“

Der Abtaubetrieb einer luftgekühlten Wärmepumpe

Neben der zuvor dargelegten Berechnungsgrundlage zur Einhaltung der minimalen Laufzeit der Verdichter muss bei luftgekühlten Wärmepumpen auch der Abtaubetrieb berücksichtigt werden.

Prinzipiell unterscheidet sich die Kalkulation eines Pufferspeichers für einen Kaltwassersatz nicht von der Kalkulation einer Wärmepumpe für den stationären Kühl- bzw. Heizbetrieb. Bei luftgekühlten Wärmepumpen muss jedoch zusätzlich der Aspekt der Abtauung berücksichtigt werden.

Als Ausgangsbasis dient hier die Lastabnahme aller aktiven Verbraucher während der Abtauung. Sofern keine anderen konkreten Informationen vorliegen, sollte die Heizleistung der Verbraucher im Auslegungszustand eingetragen werden. Die Lastabnahme der Verbraucher führt zu einer Temperatursenkung im Hydraulikkreislauf – ebenso wie die Kälteleistung des Kreislaufes, der sich in der Abtauung befindet. Die Kälteleistung während der Abtauung muss zu der benötigten Heizleistung der Verbraucher addiert werden. Beide Faktoren sorgen für einen Temperaturabfall im System. Für eine Temperaturerhöhung sorgt jedoch der Kältekreislauf, der sich noch im Heizbetrieb befindet.

Daher ist diese Heizleistung von der Heizleistung der Verbraucher und der Kälteleistung des Abtauprozesses zu subtrahieren. Voraussetzung ist jedoch, dass das Gerät mehr als einen Kältekreislauf besitzt. Ansonsten ist der Wert der Heizleistung gleich „0“. Die Herleitung des konstanten Faktors wurde bereits erläutert.

Über die maximale Dauer des Abtaubetriebes kann nur der Hersteller verbindliche Aussagen treffen. Typischerweise kann die Dauer der Abtauung zwischen 2 und 9 Minuten betragen. Die Dauer ist jedoch vornehmlich abhängig von der bereitgestellten Heizleistung, der Umgebungstemperatur und relativen Luftfeuchtigkeit des Gerätes. Das ΔT im Hydraulikkreislauf gibt an, wie hoch der maximal erlaubte Temperaturabfall im Hydraulikkreislauf während des Abtaubetriebes sein darf.

Kalkulation eines Pufferspeichers für einen Kaltwassersatz:

$$V = \frac{(Q_{\text{Verbraucher}} + Q_{\text{Kälte}} - Q_{\text{Heiz}}) \cdot \text{Faktor} \cdot T_{\text{MaxAbtauung}}}{\Delta T_{\text{Hydraulik}}}$$

Hierbei stehen die einzelnen Variablen für:

V	[kg bzw. l]	Minimaler Systeminhalt	Faktor	[-]	Faktor für Einheiten
$Q_{\text{Verbraucher}}$	[kW]	Heizleistung der aktiven Verbraucher	$T_{\text{MaxAbtauung}}$	[min]	Maximale Abtauzeit
$Q_{\text{Kälte}}$	[kW]	Kälteleistung bei Abtauung	$\Delta T_{\text{Hydraulik}}$	[K]	ΔT Hydraulikkreislauf
Q_{Heiz}	[kW]	Heizleistung Kreislauf im Heizbetrieb			

Beispielrechnung

Hierbei handelt es sich um eine optimierte, reversible Luft-Wärmepumpe zum Kühlen und Heizen in schallreduzierter Ausführung. Die Warmwasservorlauftemperatur kann bis zu 65 °C betragen und das Gerät arbeitet bis –20 °C im reinen Heizbetrieb.

- Nennkälteleistung: 116 kW, bei Wasser 12 °C/7 °C und 35 °C Außenlufttemperatur
- Nennheizleistung: 135 kW, bei Wasser 40 °C/45 °C und 7 °C Außenlufttemperatur
- Anzahl Verdichter: 4 Scrollverdichter
- Anzahl Kältekreisläufe: 2

Auslegungsbedingungen und Leistungen:

- Kälte: 116 kW, bei Wasser 12 °C/7 °C und 35 °C Außenlufttemperatur
- Wärme: 69,9 kW bei Wasser 40 °C/45 °C und –14 °C Außenlufttemperatur



AWT-HT/LN-CA-E 0404

Berechnung Pufferspeicher für den Kaltwasserbetrieb:

$$V = \frac{(116 \text{ kW} \cdot 0,25 - 0 \text{ kW}) \cdot 14,32 \cdot 1 \text{ min}}{1,25 \text{ K}} = 332 \text{ l}$$

Die Mindestlaufzeit der eingesetzten Scrollverdichter beträgt 1 Minute. Der Teillastfaktor für die minimale Teillaststufe beträgt aufgrund der vier Verdichter 25 %.

Berechnung Pufferspeicher für den Abtaubetrieb:

$$V = \frac{(69,9 \text{ kW} + 78 \text{ kW} - 34,95 \text{ kW}) \cdot 14,32 \cdot 5 \text{ min}}{5 \text{ K}} = 1.617 \text{ l}$$

Als Heizleistung der Verbraucher wurde die Heizleistung des Gerätes bei –14 °C angesetzt. Die Leistung von 78 kW entspricht der maximalen Kälteleistung eines Kreislaufes während der Abtattung. Dieser Wert kann dem technischen Datenblatt des Gerätes entnommen werden oder ist vom Hersteller zu erfragen. Die Heizleistung von 34,95 kW entspricht der Heizleistung eines Kältekreislaufes während der Abtattung bei –14 °C. Die Dauer der Abtattung wurde mit 5 Minuten kalkuliert, wobei der Temperaturabfall im Hydraulikkreislauf maximal 5 K betragen durfte.

Die Schlussfolgerung daraus: Die Kalkulation und das Volumen des benötigten Pufferspeichers für den Kaltwasserbetrieb zur Sicherstellung der Mindestlaufzeit der Verdichter und für den Abtaubetrieb unterscheiden sich deutlich. Daher sind bei luftgekühlten Wärmepumpen immer beide Berechnungen durchzuführen. Das größere Volumen muss dann letztendlich für die Realisierung des Projektes berücksichtigt werden. Etwaige Speicherverluste bleiben bei der Berechnung unberücksichtigt. Alternativ kann zur Berechnung bis 50 kW Heizleistung auch die VDI 4645 herangezogen werden.

Änderung des Faktors in Abhängigkeit von der Art und Konzentration des Glykols

Der Faktor 14,32 ergibt sich durch die Umrechnung der Einheiten.

$$\dot{m} \cdot \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] = \frac{\dot{Q} \cdot \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right] \cdot 3.600 \cdot \frac{\text{s}}{\text{h}}}{c \cdot 4,19 \cdot \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \cdot \Delta T \cdot [\text{K}]} = 860 \cdot \frac{\dot{Q}}{\Delta T} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 14,32 \frac{\dot{Q}}{\Delta T} \left[\frac{\text{kg}}{\text{min}} \right]$$

Die grau markierten Einheiten können gegeneinander gekürzt werden. Dabei wird die spezifische Wärmekapazität von 4,19 kJ/kg · K für Wasser angenommen. Im nächsten Schritt wird über den Massenstrom „ \dot{m} “, die spezifische Dichte „ ρ “ und die Laufzeit der Verdichter das Volumen des Pufferspeichers berechnet. Die spezifische Dichte des Wassers beträgt dabei 1 kg/l.

$$V [\text{l}] = \frac{\dot{m} \cdot \left[\frac{\text{kg}}{\text{min}} \right]}{\rho \cdot \left[\frac{\text{kg}}{\text{l}} \right]} \cdot T_{\text{Laufzeit}} [\text{min}]$$

Bei der Verwendung von Glykol ändern sich in Abhängigkeit von der Art und Konzentration des Glykols sowohl die spezifische Wärmekapazität als auch die spezifische Dichte. Dies hat Auswirkungen auf den Faktor. Der korrigierte Faktor kann der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

So kann sich das benötigte Volumen des Mindest-Systeminhaltes bei der vorherigen Rechnung mit 35 % Ethylenglykol von 332 l auf 407 l für den Kaltwasserbetrieb erhöhen. Dies entspricht einer Zunahme von 22,5 %. Aufgrund der mathematischen Abhängigkeit steigt auch das benötigte Volumen für den Abtaubetrieb um die gleiche Prozentzahl auf 1.982 l an.

Faktor in Abhängigkeit von der Art und Konzentration des Glykols:

Konzentration	Wasser	Ethylenglykol	Propylenglykol
20 %	–	15,89	–
25 %	–	16,41	15,72
30 %	–	16,96	16,07
35 %	–	17,55	16,44
40 %	–	18,15	16,86
45 %	–	18,87	17,35
50 %	–	19,57	17,91
100 %	14,32	–	–

Berechnung einer Wasservorlage als Kälte- oder Wärmespeicher

Eine weitere Betrachtungsweise ist die Vorlage eines Wasservolumens, um Ausfallzeiten des Gerätes zu überbrücken. Dies kommt bei kritischen Anwendungen wie Rechenzentren oder Produktionsprozessen in Betracht, wo z. B. die Zeit bis zum Wiederanlauf des Gerätes und der Erreichung der maximalen Last überbrückt werden muss.

Hierbei ist in erster Linie zu beachten, dass der Pufferspeicher entgegen der vorherigen Betrachtungsweise im Wasseraustritt des Gerätes zu installieren ist. Eine hydraulische Verbindung zum Wassereintritt des Gerätes muss vermieden werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass der Pufferspeicher vollständig mit dem entsprechenden Volumen und der benötigten Vorlauftemperatur befüllt ist.

Parameter zur Berechnung sind dabei:

- $\dot{V}_{\text{Verbraucher}}$ – Volumenstrom der Verbraucher [m^3/h]
- $t_{\text{Überbrückung}}$ – Zeitraum, der überbrückt werden muss [min]

Berechnung einer Wasservorlage als Kälte- oder Wärmespeicher:

$$\text{Volumen Pufferspeicher [l]} = \frac{\dot{V}_{\text{Verbraucher}} \cdot \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \cdot t_{\text{Überbrückung}} \cdot [\text{min}] \cdot 1.000 \cdot \left[\frac{\text{l}}{\text{m}^3} \right]}{60 \cdot \left[\frac{\text{min}}{\text{h}} \right]}$$

Beispiel:

Wird ein Volumenstrom der Verbraucher von $17,37 \text{ m}^3/\text{h}$ benötigt, was einer Leistung von 100 kW bei einer Temperaturdifferenz von 5 K entspricht, wird zur Überbrückung von 10 Minuten ein Pufferspeichervolumen von 2.895 l benötigt.

Hinweis: Der Pufferspeicher als Kälte- oder Wärmespeicher im Wasseraustritt des Gerätes ersetzt nicht den Pufferspeicher zur Sicherstellung der Mindestlaufzeit der Verdichter im Eintritt des Gerätes.

Alle Berechnungen können auch über ein Kalkulationsblatt von Mitsubishi Electric berechnet werden. Dabei unterstützt der jeweils persönliche Ansprechpartner von Mitsubishi Electric.

Mitsubishi Electric ist für Sie da

Mitsubishi Electric Europe B.V.

Living Environment Systems
Mitsubishi-Electric-Platz 1
D-40882 Ratingen
Phone +49 2102 486-0
Fax +49 2102 486-1120
les@meg.mee.com
www.mitsubishi-les.com

Unsere Klimaanlage und Wärmepumpen enthalten fluorierte Treibhausgase R410A, R134a und R32.
Weitere Informationen finden Sie in der entsprechenden Bedienungsanleitung.

Alle Angaben und Abbildungen ohne Gewähr. Nicht alle Produkte sind in allen Ländern verfügbar.