

## Wärmerückgewinnung versus Wärmepumpe

# Grenzen und Möglichkeiten beider Systeme und deren Kombination im RLT-Gerät

Der folgende Beitrag diskutiert die Leistungsmöglichkeiten der Wärmepumpe und der Wärmerückgewinnung (WRG) bei der Bereitstellung von Wärme für Gebäude, sowie die Frage, welches System dem anderen aus energetischen Gründen vorzuziehen ist und welche Möglichkeiten sich aus der Kombination beider ergeben. Messdaten aus einem integrierten Gesamtsystem ergänzen die Grundsatzfragen.

TEXT: Christoph Kaup, Boris Wollscheid und Lukas Thomas

Im Rahmen der aktuellen Diskussion zur Bereitstellung von Wärme für die Gebäudeheizung wird die Wärmepumpe als universelle Lösung der Energiewende gesehen, da mit ihr Umweltwärme oder Geothermie in Form regenerativer Energie genutzt werden kann. Fossile Energieträger sollen durch sie ersetzt werden, um die Abhängigkeit von weltweiten Gas- oder Öllieferungen signifikant zu reduzieren.

Gerade bei der Nutzung von Raumlufttechnischen Anlagen kann auch die Abwärme der Abluft als eine bevorzugte Energieressource für die Wärmepumpe verwendet werden. Dabei nutzt aber auch die Wärmerückgewinnung (WRG) dieses Potenzial zur Vorerwärmung der benötigten Außenluft. Beide Systeme konkurrieren letztlich um dasselbe Abwärmepotenzial. Es entsteht dabei eine widersprüchliche Situation, da die Nutzung dieses Potenzials mittels Wärmepumpe als regeneratives Verfahren bewertet wird, während die Nutzung desselben Potenzials mittels WRG nicht als regenerativ anerkannt wird. Die WRG wird in diesem Fall „nur“ als Effizienzmaßnahme betrachtet. Laut dem aktuell verabschiedeten Gebäudeenergiegesetz darf die WRG nicht mehr als unvermeidbare Abwärmennut-

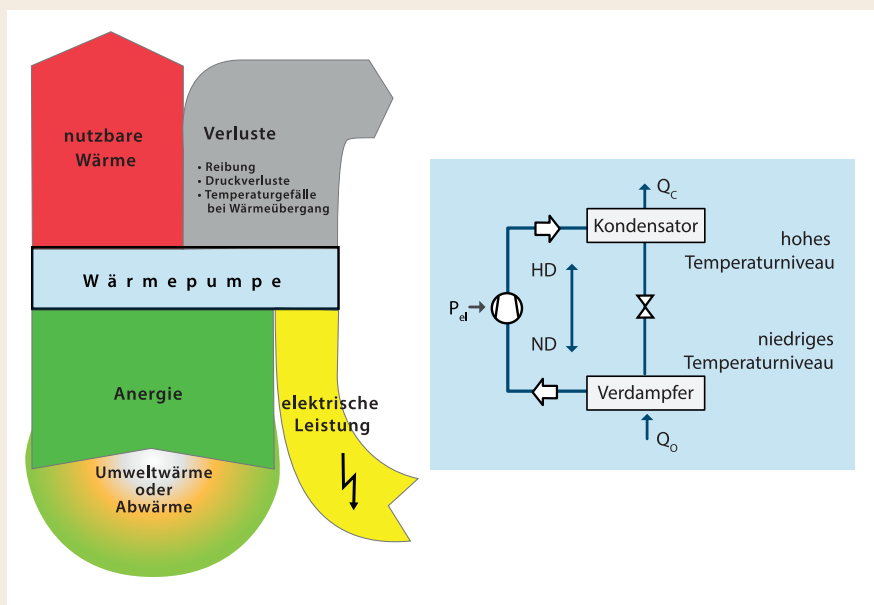


Bild 1: Energiefluss am Beispiel einer Kompressionswärmepumpe. Grafik: Howatherm

zung angerechnet und damit der regenerativen Energienutzung gleichgestellt werden.

## Die Güte der Wärmepumpe

Mit der Wärmepumpe kann Energie, also nicht direkt nutzbare Energie, durch die

Zufuhr von Energie (zum Beispiel elektrischer Energie) zu Exergie, also nutzbarer Energie, umgewandelt werden (Bild 1). Die nutzbare Wärmeenergie in Form von Exergie ergibt sich aus dem Carnot'schen Kreisprozess, der sich unter vollständig reversiblen Bedingungen aus den Temperaturniveaus der Wärmequelle und der

Wärmesenke bestimmt und den höchsten realisierbaren Wirkungsgrad ( $\phi$ ) der Wärmepumpe darstellt.

$$\phi = (T_1 - T_2) / T_1$$

$$\phi = 1 - T_2 / T_1 \quad \text{wobei } T_1 > T_2$$

Die maximal erreichbare Leistungsziffer ( $\epsilon_{\max}$ ) einer Wärmepumpe berechnet sich aus dem Kehrwert des Carnot'schen Wirkungsgrades mit:

$$\epsilon_{\max} = 1 / \phi$$

Da die Komponenten der Wärmepumpe reibungsbehaftet sind, müssen die Wirkungsgrade der Komponenten ( $\eta$ ) berücksichtigt werden. Damit folgt für die realisierbare Leistungsziffer ( $\epsilon_{\text{eff}}$ ):

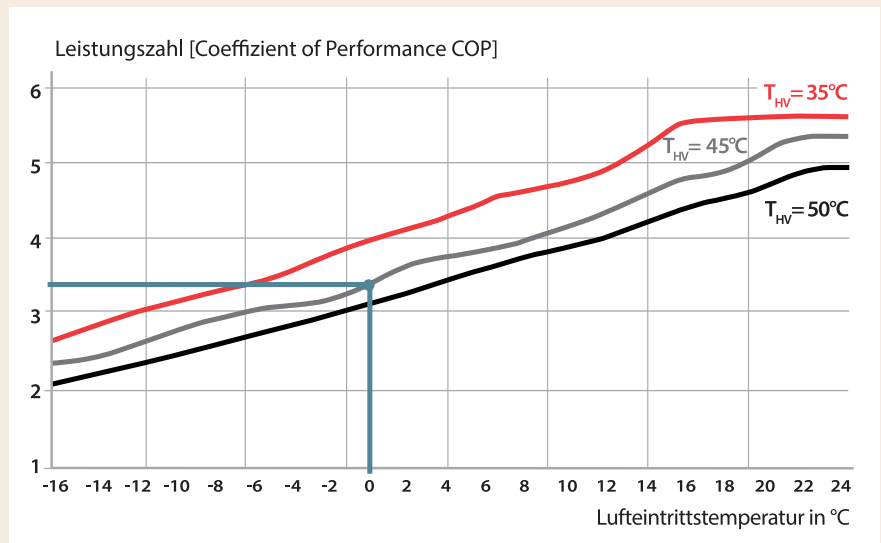
$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_{\max} \cdot \eta = 1 / \phi \cdot \eta$$

Wird beispielsweise mittels Außenluft (Umweltwärme) mit einer Temperatur von 0 °C eine Vorlauftemperatur von 45 °C erzeugt, würde sich eine maximale Leistungsziffer nach Carnot von

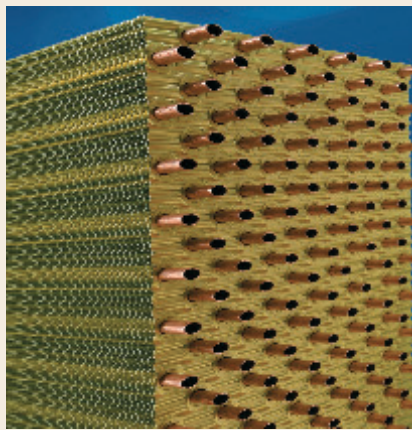
$$\epsilon_{\max} = 318,15 \text{ K} / (45 - 0) \text{ K} = 7,1$$

errechnen. Bei einem realistischen Gesamtwirkungsgrad der verschiedenen Komponenten (Verluste durch Reibung, Wärmeübertragung und Verdichtung sowie der elektrischen Hilfsenergie) von  $\eta = 48 \%$  würde sich gemäß **Bild 2** eine realisierbare und effektive Leistungsziffer von  $\epsilon_{\text{eff}} = 3,4$  einstellen.

Aus diesen Zusammenhängen wird schnell ersichtlich, welche prinzipiellen Möglichkeiten bestehen, die Effizienz der Wärmepumpe positiv zu beeinflussen. Zuerst einmal ist es sinnvoll, das Temperaturniveau der Wärmequelle so hoch wie möglich zu wählen. Daher erscheint die Abluft als Wärmequelle ( $T_1$ ) besonders vorteilhaft, da die Außenluft in der Regel ein niedrigeres und damit ungünstigeres Temperaturniveau besitzt. Des Weiteren sollte das Temperaturniveau der nutzbaren Wärme (Wärmesenke  $T_2$ ) so niedrig wie möglich sein. Daher sollte die Vorlauftemperatur zur Wärmeabgabe so weit wie möglich verringert werden. Zudem soll der Gesamtwirkungsgrad der Wärmepumpe so hoch wie möglich sein. Aus diesem Grund werden zum Beispiel vorteilhafte Scrollverdichter im Gegensatz zu Hubkolbenverdichtern eingesetzt. Weitere Maßnahmen wie Dampfeinspritzung und



**Bild 2:** Beispielhafter Verlauf der Leistungsziffer  $\epsilon_{\text{eff}}$  einer Luft-Wasser-Wärmepumpe für verschiedene Außen- und Vorlauftemperaturen. Grafik: Wolf.eu



**Bild 3:** Wärmeübertrager mit strukturierter Lamelle (+20 Prozent Fläche) zur Leistungssteigerung und Ovalrohr zur Druckabfallreduktion (-40 Prozent) Abbildung: Schiller-Krenz

Economizer (geteilte Verdampfer mit Unterkühlungsfunktion) können die Effizienz des Kältemittelprozesses steigern.

## Die Güte der Wärmerückgewinnung

Die Wärmerückgewinnung arbeitet direkt nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, denn das Temperaturpotenzial kann ohne Pumpen zur Wärmeübertragung von der Quelle zur Temperatursenke genutzt werden. Da die Abluft im Winter in der Regel wärmer ist als die Außenluft, entfällt das Anheben (Pumpen) der Temperaturniveaus. Dennoch wird auch bei der WRG Hilfsenergie benötigt, um die WRG überhaupt nutzen zu können, da die Wärmeübertrager im Zu-

und Abluftstrom Druckverluste erzeugen, die mit elektrischer Energie überwunden werden müssen.

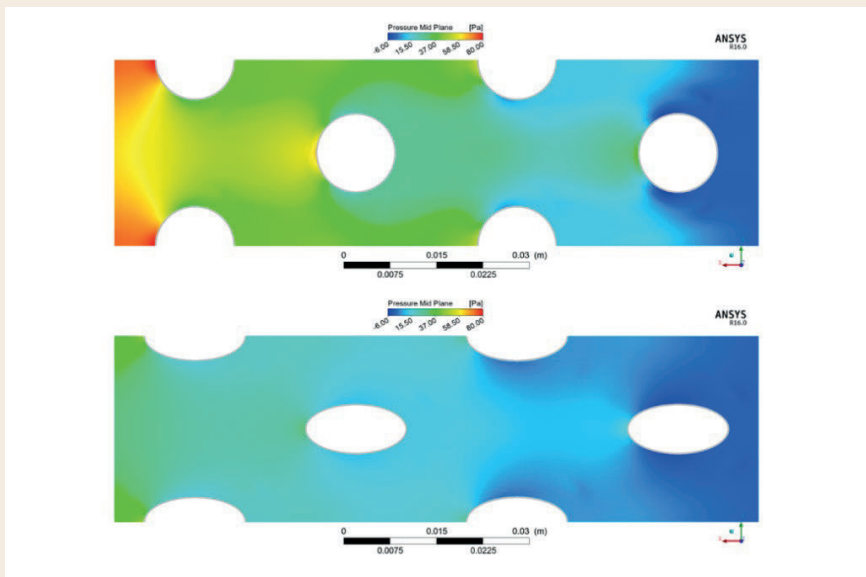
Aus diesem Zusammenhang wird deutlich, dass neben einem hohen Temperaturübertragungsgrad der WRG möglichst niedrige Druckverluste angestrebt werden müssen, um die Hilfsenergie zu mindern und damit die Effizienz der WRG zu verbessern.

Der Temperaturübertragungsgrad der WRG ergibt sich aus der Gegenstrombeziehung und hängt von NTU (number of transfer units) ab.

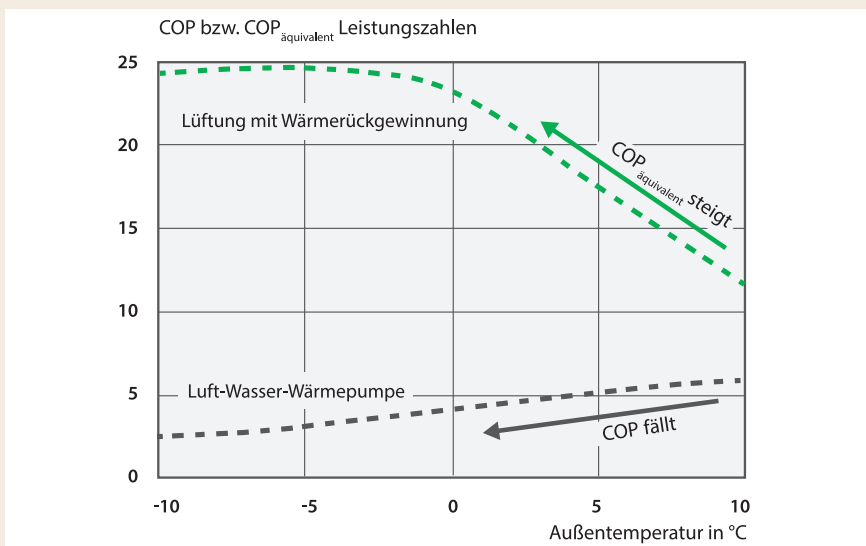
$$NTU = k \cdot A / W$$

NTU beschreibt also mit welcher Güte ( $k$ -Zahl) eine wärmeübertragende Fläche ( $A$ ) einen Wärmekapazitätsstrom ( $W = \text{Massenstrom des zu temperierenden Mediums mal spezifischer Wärmekapazität}$ ) temperieren kann.

Einzige Eingriffsmöglichkeit zur Leistungssteigerung für den Hersteller der WRG stellt damit die Steigerung der  $k$ -Zahl (Wärmeübertragung) oder die Wahl der installierten wärmeübertragenden Fläche dar, aber eben auch die Druckverlustcharakteristik und damit letztlich insbesondere die Höhe des luftseitigen Druckabfalls, der toleriert werden muss, um die  $k$ -Zahl mittels erzwungener Strömung zu erzielen. Beispielsweise lässt sich durch eine spezielle, strukturierte Lamellengeometrie die Leistung deutlich erhöhen, da sich die Fläche um rund +20 Prozent vergrößert, ohne damit den Druckabfall zu erhöhen (**Bild 3**). ▶



**Bild 4:** Druckverlustreduktion um –40 Prozent durch Ovalrohrgeometrie. Grafik: Howatherm



**Bild 5:** Vergleich äquivalenter Leistungszahlen der WRG mit Wärmepumpen.<sup>1)</sup>  
Quelle und Grafik: Prof. Thomas Hartmann

Eine deutliche Reduktion des Druckabfalls um etwa –40 Prozent bei gleicher Wärmeleistung ist zudem möglich, wenn beispielsweise die Rundrohre im Wärmeübertrager durch strömungsgünstige Ovalrohre ersetzt werden (Bild 3 und Bild 4).

Messungen des TÜV Süd haben ergeben, dass der Temperaturübertragungsgrad eines Kreislaufverbundsystems (KVS) mit einer effektiven Bautiefe von 720 Millimetern unabhängig von der Rohrform 75 Prozent ergab, wobei die Druckverluste durch die Verwendung von Ovalrohren gegenüber Rundrohren um 40 Prozent reduziert werden konnten. Der medienseitige Widerstand lag bei ver-

gleichbarer Solesgeschwindigkeit auf einem vergleichbaren Niveau. Die äquivalente Leistungsziffer der WRG konnte durch die optimierte Ovalrohrgeometrie von 15,2 auf 24,3 gesteigert werden. Dies bedeutet, dass mit identischer wärmeübertragender Fläche statt 15,2 kW Wärmeleistung (Nutzen) mit dem Ovalrohrsystem 24,3 kW mit 1 kW elektrischen Aufwands zurückgewonnen werden können.

### Wärmerückgewinnung und Wärmepumpe im Vergleich

Wenn die äquivalenten Leistungszahlen der WRG mit denen der Wärmepumpe in

Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur verglichen werden, wird deutlich, dass beide Leistungszahlen umgekehrt proportional zueinander sind (Bild 5). Während die Leistungszahl der WRG mit sinkender Außenlufttemperatur steigt, sinkt diese bei der Wärmepumpe und umgekehrt. Bei der Wärmepumpe hängt dies mit dem Carnot-Wirkungsgrad zusammen. Während bei der WRG die Wärmeleistung und damit der Nutzen der WRG mit sinkender Außenluft steigt, bleibt der elektrische Aufwand bedingt durch den Druckabfall praktisch unabhängig vom Temperaturniveau konstant und wird nur durch den geförderten Volumenstrom bestimmt. Zudem wird denkbare sofort klar, dass Wärme nur dann „gepumpt“ werden muss, wenn der zweite Hauptsatz der Thermodynamik nicht direkt angewendet werden kann. Wenn Wärme bereits auf einem höheren Niveau vorhanden ist, kann diese Wärme – auch ohne „Pumpen“ – direkt genutzt werden. Somit wird deutlich, dass die WRG der Wärmepumpe aus energetischen Gründen prinzipiell vorzuziehen ist. Erst wenn die direkte Nutzung durch die WRG nicht mehr ausreicht und Anergie in Exergie umgewandelt (gepumpt) werden muss, macht eine Wärmepumpe überhaupt erst energetisch Sinn.

### Wärmerückgewinnung und Wärmepumpe in Kombination

Da die WRG die notwendige Zulufttemperatur (beispielsweise 20 °C) bei tiefen Außenlufttemperaturen nicht immer allein sicherstellen kann, könnte die Wärmepumpe in Ergänzung zur WRG additiv genutzt werden. In Bild 6 ist die Kombination aus WRG und Wärmepumpe dargestellt. Die benötigte zusätzliche Wärme (im Beispiel +5 K) wird durch die Kondensatoreinheit nach der WRG an den Zuluftstrom abgegeben. Auf der Fortluftseite, nach der WRG, ist die Verdampfer-einheit zur Wärmeauskopplung positioniert, welche die Wärme (Anergie) dem Fortluftstrom entziehen kann.

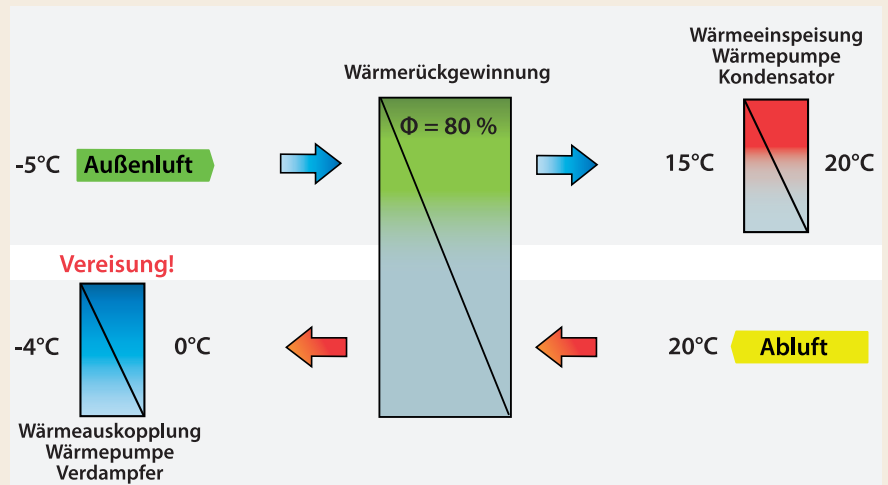
#### F U ß N O T E

<sup>1)</sup> Hartmann, T.: Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung als nachhaltige Schlüsseltechnologie zur Erreichung der Klimaziele (COP-Äquivalenzstudie), Kurzstudie mit Validierung aus der Praxis, 2021.

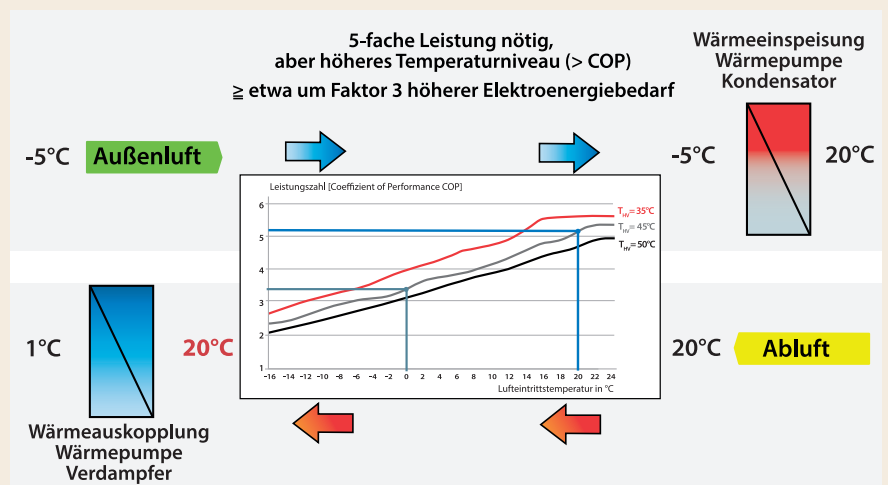
Zwar ist die Fortlufttemperatur in diesem Beispiel 20 K niedriger als die Ablufttemperatur, weil die Abluft durch die WRG im Beispiel um 20 K gekühlt wird, aber sie liegt damit immer noch 5 K (0 °C zu -5 °C) über dem vergleichbaren Außenlufttemperaturniveau. Damit wäre zum Beispiel eine geothermische Quelle mit einem Temperaturniveau von beispielsweise +10 °C trotzdem der Abwärme nach der WRG vorzuziehen.

Problematisch ist allerdings die Abluftbeziehungswise Fortluftfeuchte zu bewerten, da die Abluft aus dem Raum im Regelfall Feuchtelasten enthält, die im Verdampfer – im Gegensatz zum trockenen Außenluftbetrieb – viel schneller zu einer Vereisung führen können. Dieser Vereisungsfall ist zwingend zu vermeiden, da ansonsten die Funktion der Lüftung zum Erliegen käme, wenn der Wärmeübertrager auf der Abluftseite ein- oder sogar zufriert. Zwar kann der Verdampfer mittels elektrischer Energie oder durch Umschaltung der Wärmepumpe durch Heißgas wieder enteist werden, jedoch kann dieses Prozedere mehrmals pro Stunde erforderlich werden. Alternativ können auch zwei Verdampfer im Wechsel betrieben werden, während der eine Verdampfer vereist, wird der zweite Verdampfer enteist. Während der Enteistung fällt allerdings die Wärmepumpe in ihrer Funktion zur Lufterwärmung aus, obendrein muss Wärme zur Enteistung bereitgestellt werden, die dem Prozess der WRG dann nicht mehr zur Verfügung steht. Es stellt sich damit die Frage, ob die Wärmebereitstellung nicht energetisch sinnvoller alleine über die Wärmepumpe (ohne Nutzung der WRG) realisiert werden kann. **Bild 7** stellt das Ergebnis dar, wenn die WRG entfallen würde.

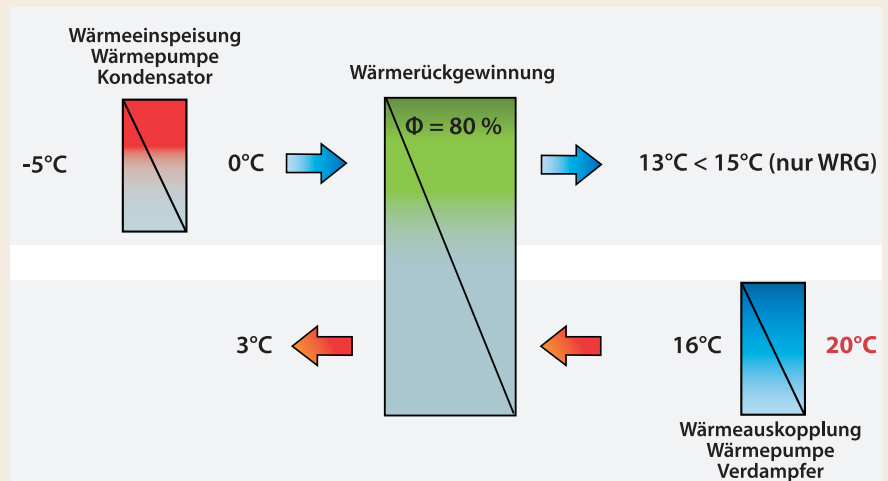
In diesem Fall würde die Abwärme der Abluft mit ihrem vollen Temperaturpotenzial der Wärmepumpe zur Verfügung stehen. Die Leistungsziffer würde sich bei den verschiedenen Temperaturniveaus der Quelle von beispielsweise 3,4 (bei 0 °C mit WRG) auf 5,2 (bei 20 °C ohne WRG) um den Faktor 1,5 erhöhen (vergleiche Bild 2). Allerdings müsste



**Bild 6:** Kombination aus WRG mit einer Wärmepumpe bei -5 °C Außenlufttemperatur.<sup>2)</sup>  
Grafik: Howatherm



**Bild 7:** Nutzung der Wärmepumpe ohne WRG bei -5 °C Außenlufttemperatur.  
Grafik: Howatherm



**Bild 8:** Nutzung der Wärmepumpe vor der WRG bei -5 °C Außenlufttemperatur.  
Grafik: Howatherm

F U B N O T E

2) Die Temperaturänderungen auf der Abluftseite wurden in den Beispielen vereinfacht ohne Entfeuchtung berechnet. Je nach Abluftfeuchte im konkreten Fall ändern sich die Fortlufttemperaturen, da der latente Wärmeanteil mit steigender Abluftfeuchte steigt und der sensible Wärmeanteil sinkt.

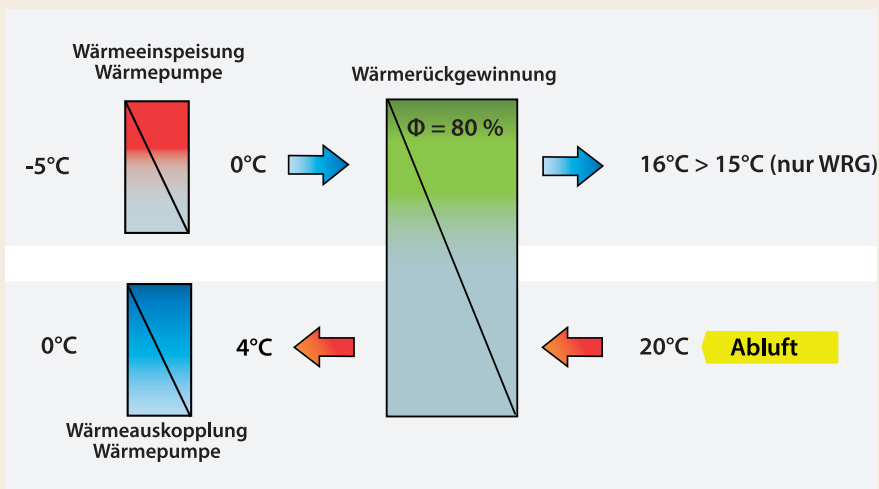


Bild 9: Nutzung der Wärmeeinspeisung vor der WRG bei -5 °C Außenlufttemperatur. Grafik: Howathern

die Wärmepumpe die volle Zulufttemperaturerwärmung (von -5 °C auf 20 °C) erbringen. Damit wäre eine um den Faktor 5 höhere Wärmeleistung durch die Wärmepumpe alleine zu schultern. In Summe müsste also die elektrische Leistung zum Beispiel rund um den Faktor 3 erhöht werden (theoretisch Faktor 3,3 abzüglich der Hilfsenergie für die entfallene WRG).

Aus diesem Ergebnis wird deutlich, dass die primäre Nutzung der WRG immer energetisch sinnvoller ist. Der Vorteil des Entfalls der WRG liegt allerdings in der höheren Fortlufttemperatur nach dem Verdampfer, da in diesem Fall noch positive Fortlufttemperaturen (im Beispiel bei +1 °C) eine Vereisung verhindern.

Was würde jedoch passieren, wenn die Anordnung der Wärmepumpe und der WRG im Vergleich zu Bild 6 getauscht würde und die Wärmepumpe jetzt vor der WRG installiert würde? Bild 8 zeigt diesen Fall, wobei in diesem Beispiel die thermische Leistung (+5 K in der Zuluft) der Wärmepumpe identisch zu dem in Bild 6 abgebildeten Fall angenommen wurde. Die Außenluft würde dann von -5 °C auf 0 °C angehoben werden. Gleichzeitig stünde die Abluft mit einem hohen Niveau von 20 °C der Wärmepumpe als Quelle zur Verfügung. Allerdings würde damit der WRG nach der vorgeschalteten Wärmepumpe nur 16 °C Ablufttemperatur und 0 °C Außenlufttemperatur, also ein Potenzial von 16 K zur Verfügung stehen. Bei einem Übertragungsgrad von 80 Prozent ergäbe sich damit eine Zulufttemperatur nach der WRG von aufgerundet 13 °C.

Im Vergleich hierzu erreicht die WRG ohne Wärmepumpe bereits eine Zulufttemperatur von 15 °C (vergleiche Bild 6). Es macht also energetisch überhaupt keinen Sinn, die Wärmepumpe vor der WRG einzubinden.

Bild 9 zeigt dagegen die Einbindung der Wärmeeinspeisung auf der Außenluftseite, wobei die Auskopplung weiterhin nach der WRG (Fortluft) angeordnet bleibt. In diesem Fall wird eine Zulufttemperatur nach der Kombination von 16 °C erreicht. Es wird aber auch mit dieser Anordnung nicht die benötigte Zulufttemperatur von 20 °C erreicht.

Besonders kritisch wird die Nutzung der Kombination aus WRG mit Wärmepumpe, je tiefer die Außenlufttemperatur sinkt. Bild 10 zeigt den Auslegungspunkt bei -12 °C. In diesem Fall würde nicht

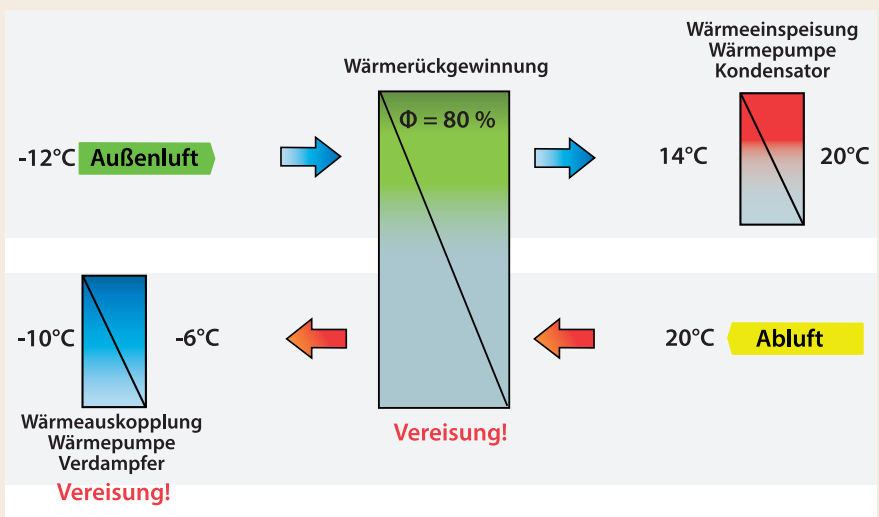


Bild 10: Nutzung der Wärmepumpe mit WRG bei Auslegungstemperatur -12 °C. Grafik: Howathern

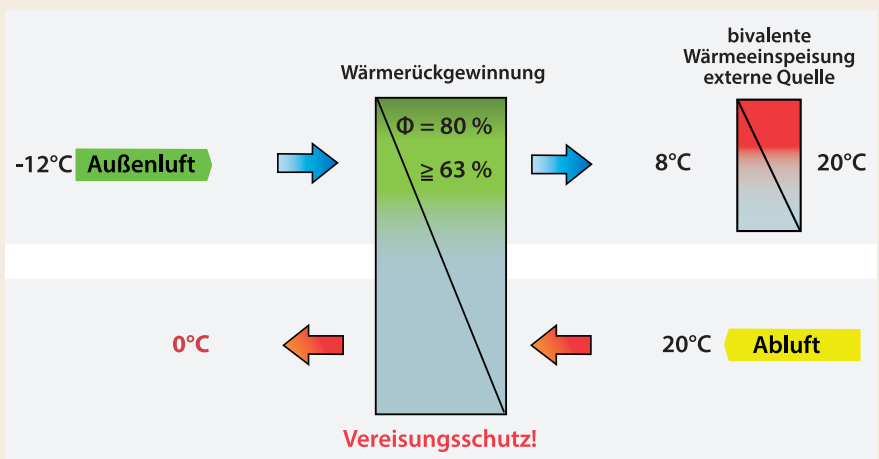


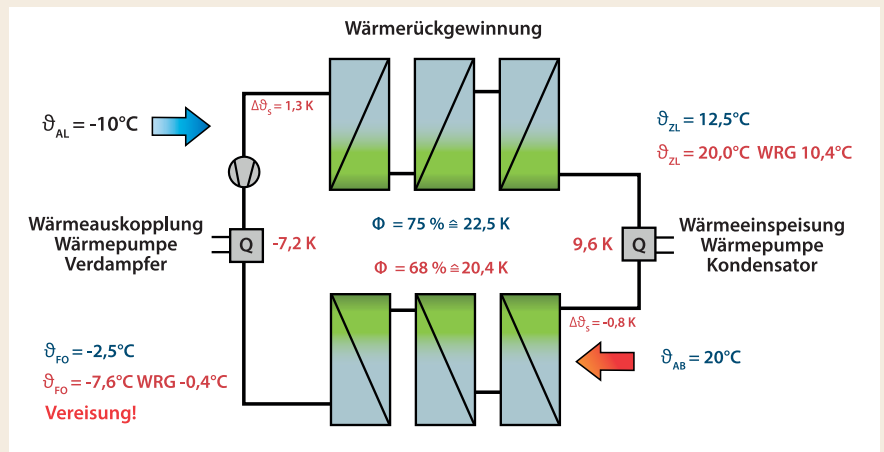
Bild 11: Nutzung der WRG mit alternativer Wärmeversorgung bei Auslegungstemperatur -12 °C. Grafik: Howathern

nur der Verdampfer der Wärmepumpe in der Fortluft vereisen, sondern bereits die davor angeordnete WRG, da sie die Fortluft ohne Leistungsregelung in der WRG auf  $-6\text{ °C}$  kühlen würde. Aus diesem Grund muss die WRG in ihrer Leistung begrenzt werden. Der Temperaturübertragungsgrad müsste von 80 Prozent auf 63 Prozent reduziert werden. Die mögliche Zulufttemperatur nach der WRG würde auf  $+8\text{ °C}$  limitiert werden (**Bild 11**). Dadurch wird letztlich die doppelte Wärmeleistung zur Nacherwärmung notwendig. Statt von  $14\text{ °C}$  auf  $20\text{ °C}$  (ohne Leistungsbegrenzung) müsste bivalent eine Nacherwärmung von  $8\text{ °C}$  auf  $20\text{ °C}$  (mit Vereisungsschutzregelung) zur Verfügung gestellt werden. Der Betrieb einer kombinierten Wärmepumpe wäre nicht sinnvoll, weil eine Wärmeauskopplung auf der Fortluftseite nicht möglich wäre, ohne eine Vereisung des Verdampfers der Wärmepumpe zu provozieren. Zumal bereits die Leistung der WRG aus Vereisungschutzgründen reduziert wird (**Bild 11**). Selbst wenn auf die WRG komplett verzichtet würde, wäre auch ein monovalenter Betrieb der Wärmepumpe bei  $-12\text{ °C}$  nahezu unmöglich, da selbst in diesem Fall die Fortluft zur Erreichung der geforderten Zulufttemperatur auf  $-5\text{ °C}$  gekühlt werden müsste, was ebenfalls zu einer Vereisung des Verdampfers führen würde.

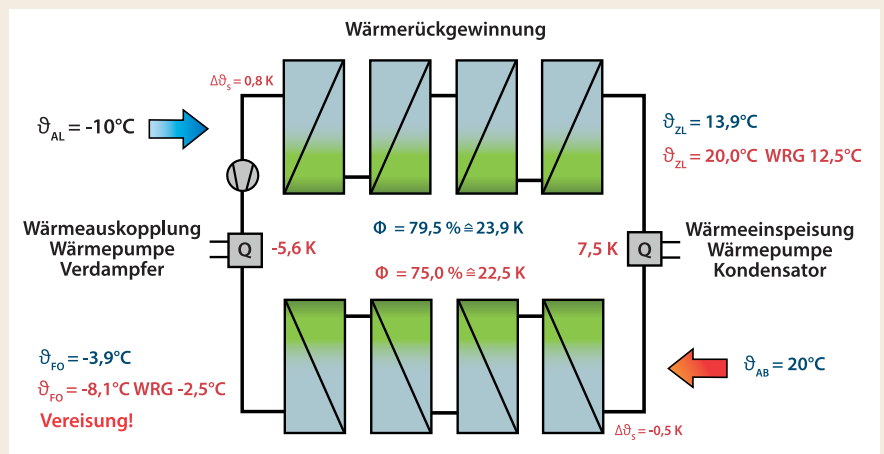
## Integration der Wärmepumpe in ein Kreislaufverbundsystem

Die Wärmepumpe kann auch in den Zwischenkreis eines Kreislaufverbundsystems (KVS) integriert werden. In diesem Fall wird die Wärmeein- und -auskopplung nicht über separate Wärmeübertrager (Verdampfer und Kondensator) im Luftstrom realisiert, sondern über Plattenwärmeübertrager im Zwischenkreis des KVS. Somit müssen die Register im Ab- oder Zuluftstrom neben der WRG-Leistung auch die zusätzlichen Wärmeleistungen der Wärmepumpe übertragen. Die Temperaturübertragungsgrade der Ab- und der Zuluftregister sind daher auch für die Berechnung der sich einstellenden Luft- und Zwischenkreistemperaturen zwingend zu berücksichtigen.

**Bild 12** zeigt ein KVS mit drei Registern und in Summe mit 24 Rohrreihen in Luftrichtung pro Luftseite. Der Übertragungsgrad des Systems (WRG) liegt bei



**Bild 12:** Nutzung der Wärmepumpe in einem KVS mit 75 Prozent Übertragungsgrad. Grafik: Howatherm



**Bild 13:** Nutzung der Wärmepumpe in einem KVS mit 79,5 Prozent Übertragungsgrad. Grafik: Howatherm

spielsweise bei 75 Prozent. Damit müssen die Register auf der Zu- und auf der Abluftseite jeweils einen Temperaturübertragungsgrad von 85,7 Prozent aufweisen. Ohne Berücksichtigung des Vereisungsschutzes der WRG und ohne Einspeisung durch die Wärmepumpe würde die WRG bei einer Außenlufttemperatur von  $-10\text{ °C}$  und einer Ablufttemperatur von  $20\text{ °C}$  eine Zulufttemperatur von  $12,5\text{ °C}$  erreichen. Wird eine Zulufttemperatur von  $20\text{ °C}$  gefordert, muss die Außenluft insgesamt um  $30\text{ K}$  erwärmt werden beziehungsweise müssen zusätzlich noch  $7,5\text{ K}$  in den Luftstrom eingekoppelt werden. Da allerdings durch die Einspeisung in den Vorlauf des Zwischenkreises der Rückgewinn des KVS negativ beeinflusst wird, reduziert sich der Übertragungsgrad des Systems rechnerisch von 75 Prozent auf 71,4 Prozent. Das bedeutet, dass der Anteil der WRG an der Gesamterwär-

mung der Außenluft von  $22,5\text{ K}$  auf  $21,4\text{ K}$  sinkt.

Durch die gleichzeitige Auskopplung auf der Rücklaufseite reduziert sich der Temperaturübertragungsgrad weiter von 71,4 Prozent auf letztlich 68,0 Prozent. Die WRG liefert hierdurch nur noch eine Erwärmung der Außenluft von  $20,4\text{ K}$ . Damit muss die Wärmepumpe nicht  $7,5\text{ K}$ , sondern  $9,6\text{ K}$  nacherwärmen, um die geforderte Wärmeleistung zu übertragen beziehungsweise die Wirkungsgradverschlechterung des KVS auszugleichen.

Auf der Austrittsseite (Rücklauf) wird hierzu ein Potenzial von  $-7,2\text{ K}$  entnommen. Mit einer zusätzlichen Temperaturerhöhung von  $2,4\text{ K}$  durch die Kompressorleistung wird dann die notwendige Zulufttemperatur von  $20\text{ °C}$  erreicht (**Bild 12**). Die Fortlufttemperatur würde bedingt durch die kombinierte Ein- und Auskopplung auf  $-7,6\text{ °C}$  gekühlt ►



Bild 14: Messungen eines KVS mit Einbindung der Wärmepumpe. Foto: Howatherm

werden, was eine Vereisung der Abluftregister sehr wahrscheinlich macht.

Soll die negative Beeinflussung durch die Einbindung der Wärmepumpe ausgeglichen werden, muss die Fläche des KVS um rund ein Drittel erhöht werden. Damit muss das KVS von 24 Rohrreihen in Luftrichtung auf 32 Rohrreihen erweitert werden. Auf Basis der Gegenstrombeziehung würde damit der Übertragungsgrad der WRG von 75 Prozent auf 79,5 Prozent gesteigert werden (vergleiche Bild 13 mit Bild 12).

Ohne Einbindung der Wärmepumpe würde das System bei  $-10\text{ °C}$  Außenluft und  $20\text{ °C}$  Ablufttemperatur eine Zulufttemperatur von  $13,9\text{ °C}$  erreichen (Rückgewinn von  $23,9\text{ K}$ ). Somit würde sich der theoretische Bedarf an zusätzlicher Nacherwärmerleistung von  $+7,5\text{ K}$  (Bild 12) auf  $+6,1\text{ K}$  (Bild 13) verringern. Zudem werden die geringeren, zusätzlichen Wärmeleistungen auch noch effizienter übertragen, da der Übertragungsgrad pro Luftseite von rund  $85,7\text{ Prozent}$  auf  $88,6\text{ Prozent}$  steigt. Die Reduktion des Systemübertragungsgrades liegt damit bedingt durch die Wärmeeinspeisung in den Vorlauf bei  $2,3\text{ Prozent}$ -Punkten ( $79,5\text{ Prozent}$  auf  $77,2\text{ Prozent}$ ), während die zusätzliche Reduktion bedingt durch die Auskopplung im Rücklauf  $2,2\text{ Prozent}$ -Punkte ( $77,2\text{ Prozent}$  auf  $75,0\text{ Prozent}$ ) beträgt. Durch die Vergrößerung der Wärmeübertragerflächen liefert die WRG unter der beschriebenen

Beeinflussung der Wärmepumpe einen Anteil an der Außenluftherwärmung von  $22,5\text{ K}$  und damit den gleichen Rückgewinn, wie das unbeeinflusste System mit  $75\text{ Prozent}$  Systemübertragungsgrad. Die Wärmepumpe muss zur Erreichung der geforderten Zulufttemperatur folglich eine Soletemperaturerhöhung (Einspeisung in den Vorlauf) von  $7,5\text{ K}$  bereitstellen. Die Soletemperaturabsenkung auf der Rücklaufseite durch die Wärmeauskopplung liegt bei  $-5,6\text{ K}$ .

Letztlich beträgt die kombinierte Beeinflussung der Vorlauftemperatur vor der Einspeisung  $-0,5\text{ K}$  im Gegensatz zu  $-1,1\text{ K}$  (beim  $75\text{ Prozent}$ igen System, Bild 12). Sie ist also nur noch rund halb so hoch, wie im Beispiel mit  $75\text{ Prozent}$  Systemübertragungsgrad. Eine Vereisung ist in diesem Fall kaum zu verhindern, da die Fortlufttemperatur auf  $-8,1\text{ °C}$  gekühlt werden muss, um die Wärmeleistung bereitstellen zu können. Am Anteil der Außenluftherwärmung lässt sich erkennen, dass die Beeinflussung der WRG durch den Betrieb einer integrierten Wärmepumpe auch bei sehr hohen Übertragungsgraden in erheblichem Maße auftritt. Die Wahl eines Systems mit 32 Rohrreihen statt mit 24 Rohrreihen erhöht aber nicht nur die Investitionskosten um rund ein Drittel, sondern auch die Druckverluste pro Luftseite, die ganzjährig ebenfalls um ein Drittel steigen. Der Übertragungsgrad der WRG, und damit der thermische Nutzen der

WRG, steigt dabei aber „nur“ um  $4,5\text{ Prozent}$ -Punkte (von  $75\text{ Prozent}$  auf  $79,5\text{ Prozent}$ ). Die äquivalente Leistungsziffer der WRG sinkt somit unter Berücksichtigung beider Effekte um etwa  $20\text{ Prozent}$ .

## Messungen an einem integrierten Gesamtsystem

Auf Basis eines Kreislaufverbundsystems mit einer integrierten Wärmepumpe wurden umfangreiche Messungen am Umwelt-Campus Birkenfeld durchgeführt. Die RLT-Anlage wurde mit  $9\,933\text{ m}^3/\text{h}$  Zuluft und  $9\,508\text{ m}^3/\text{h}$  Abluft betrieben. Die Messwerte wurden in Anlehnung an die DIN EN 308:1997 ermittelt. Der trockene Temperaturübertragungsgrad der WRG lag bei  $4,9\text{ °C}$  Außenlufttemperatur und  $20,8\text{ °C}$  Ablufttemperatur bezogen auf die Zuluft bei  $76,6\text{ Prozent}$  und bezogen auf die Abluft bei  $77,1\text{ Prozent}$ . Dabei lag die thermische Leistung der WRG bei  $38,3\text{ kW}$ . Die Leistungen wurden sowohl auf den Luftseiten als auch im Zwischenkreis ermittelt.

Die elektrische Hilfsleistung zum Betrieb der WRG lag bei  $2,1\text{ kW}$  (Ventilatoren- und Pumpenleistung). Damit wurde ein äquivalenter COP von  $18,2$  erreicht.

Die Wärmepumpe basierte auf einem Hubkolbenverdichter mit einer elektrischen Anschlussleistung von rund  $5\text{ kW}$ , die in einer hydraulischen Versorgungseinheit integriert wurde. Der Verdampfer und der Verdichter wurden ebenfalls in den Zwischenkreis des KVS eingebunden (Bild 14).

Bei gleichen Außen- und Abluftbedingungen wurde im Vollastfall der Wärmepumpe eine Verdampferleistung (Wärmeauskopplung) von  $17,6\text{ kW}$  erreicht. Die Kondensatorleistung (Wärmeeinspeisung) lag bei  $23,2\text{ kW}$ . Die Leistung der WRG wurde in diesem Fall mit  $33,8\text{ kW}$  bei  $5,1\text{ °C}$  Außenluft- und  $20,9\text{ °C}$  Ablufttemperatur ermittelt. Die Zulufttemperatur des Gesamtsystems lag bei  $22,9\text{ °C}$ . Die Temperaturerhöhung durch die Wärmepumpe lag damit bei  $+7\text{ K}$ . Durch die Einbindung der Wärmepumpe sank der Temperaturübertragungsgrad des KVS von rund  $77\text{ Prozent}$  auf  $68,6\text{ Prozent}$ . Der COP der Wärmepumpe lag in diesem Betriebsfall bei  $4,2$ , während der COP des Gesamtsystems bei  $7,3$  lag.

Im Teillastfall der Wärmepumpe (Verdampferleistung  $13,1\text{ kW}$  und Kondensatorleistung  $16,9\text{ kW}$ ) mit  $33,3\text{ kW}$  WRG-

Leistung bei 6,0 °C Außenluft- und 21,1 °C Ablufttemperatur erhöhte sich der COP der Wärmepumpe auf 4,5, während das Gesamtsystem einen COP von 8,3 erreichte. Der effektive Temperaturübertragungsgrad der WRG lag in diesem Betriebsfall bedingt durch die geringeren ein- und auszukoppelnden Wärmeleistungen der Wärmepumpe bei 71,3 Prozent. Die Zulufttemperatur lag bei 21,9 °C mit einer Temperaturerhöhung durch die Wärmepumpe von 5,1 K.

## Zusammenfassung

Die Kombination der Wärmepumpe mit der Wärmerückgewinnung ist in vielen Fällen sinnvoll, da trotz der reduzierten Ablufttemperatur nach der WRG das zur Verfügung stehende Temperaturniveau immer noch höher ist als das Niveau der Außenluft.

Allerdings kann die Kombination nicht monovalent genutzt werden, da bei tiefen Temperaturen im Winter eine Vereisung des Verdampfers auf der Fortluftseite droht. Sogar die WRG kann bei sehr tiefen Außenlufttemperaturen ( $< -5\text{ °C}$ ) einfrieren. Im Regelfall muss die WRG dann in ihrer Leistung begrenzt werden. Daher macht es keinen Sinn, nach der WRG mit der Wärmepumpe weiter „auf Gas“ zu gehen, wenn die WRG schon „gebremst“ werden muss. Eine bivalente Wärmeversorgung muss in diesen Fällen zur Verfügung stehen.

Eine Einsparung bei der maximal notwendigen Wärmeleistung ist daher bei einem bivalenten System nicht zu erwarten, da im Extremfall die Wärmepumpe im Abluftstrom keine Leistung erzeugen kann. Zumindest ein zweiter Verdampfer (beispielsweise Außenluft oder Geothermie als Wärmequelle) sind zu empfehlen.

Jedoch können nennenswerte Energiemengen durch die Wärmepumpe im Übergangsbetrieb regenerativ erzeugt werden, wobei hierbei auch beachtet werden muss, dass die Leistungsziffer des Gesamtsystems nicht auf dem Niveau der WRG selbst liegt. Sehr deutlich wird dabei der Vorteil der WRG im Vergleich zur Wärmepumpe, da die Leistungsziffer der WRG deutlich über der Leistungsziffer der Wärmepumpe liegt. Ein „Pumpen“ von Wärme macht erst dann Sinn, wenn die direkte Abwärmenutzung nicht mehr erfolgen kann oder ausreicht. Abwärme kann zudem nur einmal genutzt werden.

Bei der Ein- und Auskopplung der zusätzlichen thermischen Leistungen in ein KVS muss zwingend die Änderung der WRG-Leistung berücksichtigt werden. Die Verringerung der zurückgewonnenen Abwärme ist signifikant und damit nicht zu vernachlässigen.

Steht alternativ eine Wärmequelle (beispielsweise Abwärme aus Rechenzentren oder Geothermie) zur Verfügung, sollte vorrangig diese genutzt werden, um eine sonst notwendige bivalente Wärmeerzeugung zu vermeiden. ■



**Prof. Dr.-Ing.  
Dr. rer. pol.  
Christoph Kaup**

ist Honorarprofessor am Umwelt-Campus Birkenfeld und Geschäftsführender Gesellschafter der Howatherm Klimatechnik GmbH, Brücken.  
*Foto: Nikola Krieger*



**Boris  
Wollscheid,  
B.Eng.**

ist Produktleiter und Prokurist der Howatherm Klimatechnik GmbH sowie Lehrbeauftragter am Umwelt-Campus Birkenfeld, Hochschule Trier.  
*Foto: Nikola Krieger*



**Lukas Thomas,  
M.Sc.**

ist Leiter Forschung und Entwicklung der Howatherm Klimatechnik GmbH, Brücken.  
*Foto: Nikola Krieger*