

# Großwärmepumpen zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung

Um die Ziele der Energiewende zu erreichen, ist eine umfassende Dekarbonisierung des Wärmesektors nötig. Die Stadtwerke Lemgo setzen hierbei auf eine Großwärmepumpe, mit der sie das Abwärmepotenzial einer Kläranlage nutzen. Mit einem umfassenden Mess- und Monitoringprogramm wurden Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich COP und thermischer Leistung erarbeitet.

Für eine auf erneuerbare Energien basierende Wärmeerzeugung bietet es sich u. a. an, Großwärmepumpen zu nutzen, mit denen das Wärmepotenzial von Niedertemperaturabwärmquellen auf ein technisch nutzbares Niveau gehoben werden kann. Im Idealprozess wird hierzu zunächst das Kältemittel der Wärmepumpe mit der Niedertemperaturwärmequelle im Verdampfer isobar verdampft (Bild 1, 4 – 1). Das gerade siedende Kältemittel wird anschließend im Verdichter isentrop auf einen höheren Druck und eine höhere Temperatur gebracht (Bild 1, 1 – 2). Somit kann durch die folgende isobare Enthitzung und Kondensation (Bild 1, 2 – 3) die Wärme auf die Wärmesenke bzw. das Wärmenetz übertragen werden. Der Idealprozess endet mit der Entspannung des kondensierten Kältemittels in einer isenthalpen Drossel (Bild 1, 3 – 4).

Die Abweichungen des Realprozesses vom Idealprozess werden in Bild 2 deutlich. In den Wärmeübertragern treten Druckverluste auf, die Zustandsänderungen reichen bis in den unterkühlten respektive überhitzten Bereich und die Drossel verhält sich nicht ideal. Die Effizienz des Wärmepumpenprozesses ist im Wesentlichen von der für den Betrieb des Verdichters eingesetzten elektrischen Energie abhängig. Je größer das Verhältnis zwischen

thermischer Nutzleistung und nötiger elektrischer Leistung (coefficient of performance, COP) ist, desto effizienter ist der Betrieb der Wärmepumpe.

Die Auswahl des Kältemittels kann ebenso einen großen Einfluss auf den Wärmepumpenbetrieb haben. Hier greift eine Vielzahl von Herstellern auf Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) zurück, da dieses besonders geeignete Stoffeigenschaften offeriert. Eine hohe Wärmekapazität und Verdampfungsenthalpie von Ammoniak führen dazu, dass ein vergleichsweise kleiner Massenstrom verwendet werden kann, der wiederum unmittelbar zu einer geringeren aufzubringenden Leistung des Verdichters führt. Außerdem ist von Vorteil, dass Ammoniak ein Treibhauspotenzial und Ozonabbau-potenzial von Null zugewiesen wird.

Um trotz hohen Temperaturhubs einen effizienten Betrieb realisieren zu können, ist der zuvor beschriebene Aufbau der Wärmepumpe entsprechend anzupassen. In diesem Fall eignet sich beispielsweise eine kaskadierte Wärmepumpe. Diese besteht im Prinzip aus zwei Wärmepumpen (ein Niederdruck- sowie ein Hochdruckkreislauf), die durch einem Wärmeübertrager verbunden sind. Der Wärmeübertrager nimmt im Fall des Niederdruckkreises die Funktion des Kondensators und im

Fall des Hochdruckkreises die Funktion des Verdampfers ein. Ebenso ist die Realisierung eines Kreislaufs mit zwei Verdichterstufen möglich. Letztere Ausführung wirkt sich auf den Platzbedarf der Anlage positiv aus, da nur ein Kreislauf realisiert werden muss. Ebenso können Grädigkeitsverluste, die mit der Nutzung eines weiteren Wärmeübertragers einhergehen, vermieden und so höhere COP realisiert werden.

## Großwärmepumpe zur klimaneutralen Versorgung des historischen Stadtkerns

Die Stadtwerke Lemgo haben bereits im Jahr 2019 eine Großwärmepumpe in Betrieb genommen, mit der das im gereinigten Abwasser der Kläranlage (Reinwasser) enthaltene Abwärmepotenzial einer örtlichen Kläranlage zur Einbindung in das Wärmenetz genutzt werden kann. Hintergrund dieser Maßnahme ist das im Rahmen eines Verbundprojekts gesteckte Ziel, den historischen Stadtkern Lemgos klimaneutral mit Wärme zu versorgen. Durch eine Quellenleistung von 1,5 MW(th), die in fast 8 000 h/a zur Verfügung steht, reicht die potenziell nutzbare Abwärmemenge aus, um knapp zwei Drittel des Wärmebedarfs der Altstadt oder rd. 12 % des gesamten Wärmebedarfs des Fernwärmenet-

zes zu decken. Aus energiewirtschaftlicher Sicht bietet sich durch den Betrieb der Wärmepumpe des Weiteren die Möglichkeit, das Risiko der  $\text{CO}_2$ -Preisentwicklung zu verringern. Die Großwärmepumpe wurde in Betrieb genommen, lange bevor die Nutzung von Abwasser aus Kläranlagen als erneuerbare Wärme im Rahmen der Ausschreibung für innovative KWK-Anlagen anerkannt wurde (§ 2 Satz 9a KWKG).

Da das Klärwerk ein Mischwassersystem hat, stehen dauerhaft ausreichend große Wassermengen zur Verfügung. Die mittlere Temperatur des Reinwassers liegt bei rd.  $13^\circ\text{C}$ . Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen wurde eine Wärmepumpe mit einer Wärmeleistung von 2,4 MW der Firma GEA gewählt. Die Anlage, bei der Ammoniak als Kältemittel genutzt wird, ist zur Realisierung des hohen Temperaturhubs mit zwei Verdichtern ausgeführt. Der Betrieb findet gekoppelt statt mit einem am Standort der Wärmepumpe bereits vorhandenen Blockheizkraftwerk (BHKW), wodurch eine kostengünstige Stromversorgung durch Eigenstromnutzung gewährleistet werden kann. Durch schwankende Reinwassertemperaturen werden im Sommer mit 2,85 die höchsten COP und in den Wintermonaten die geringsten COP erreicht.

Eine besondere Herausforderung für einen wirtschaftlichen Betrieb von Großwärmepumpen stellt, bedingt durch die aktuell geltenden regulatorischen Rahmenbedingungen, die Stromversorgung dar. Wird der Strom zum Antrieb des Verdichters und weiterer Aggregate wie für einen normalen Letztverbraucher aus dem Netz bezogen, so fallen sämtliche Umlagen an. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist trotz hoher Effizienz in solchen Fällen selten möglich. In Lemgo herrschten jedoch von Beginn an beson-

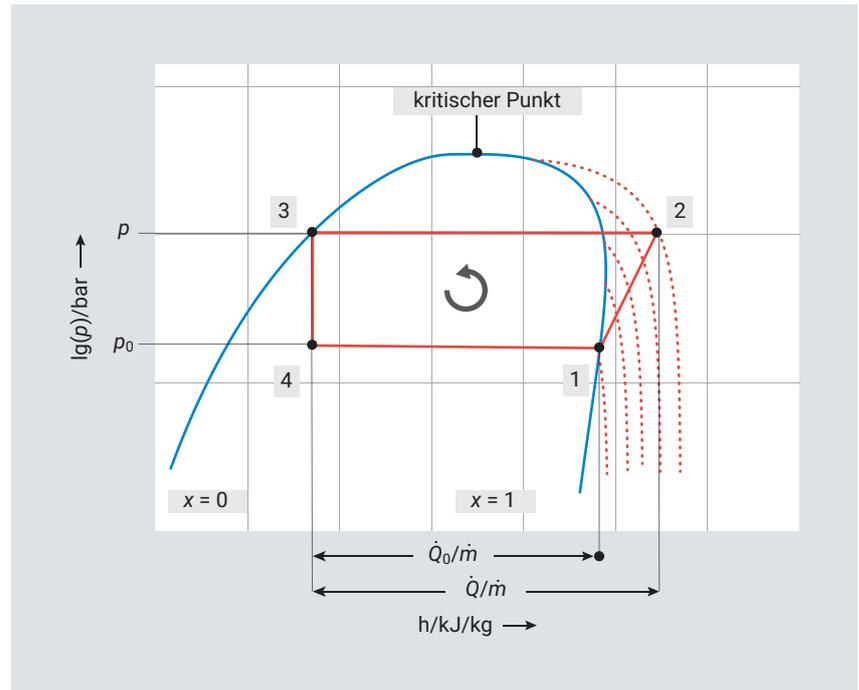


Bild 1. Idealer Wärmepumpenprozess

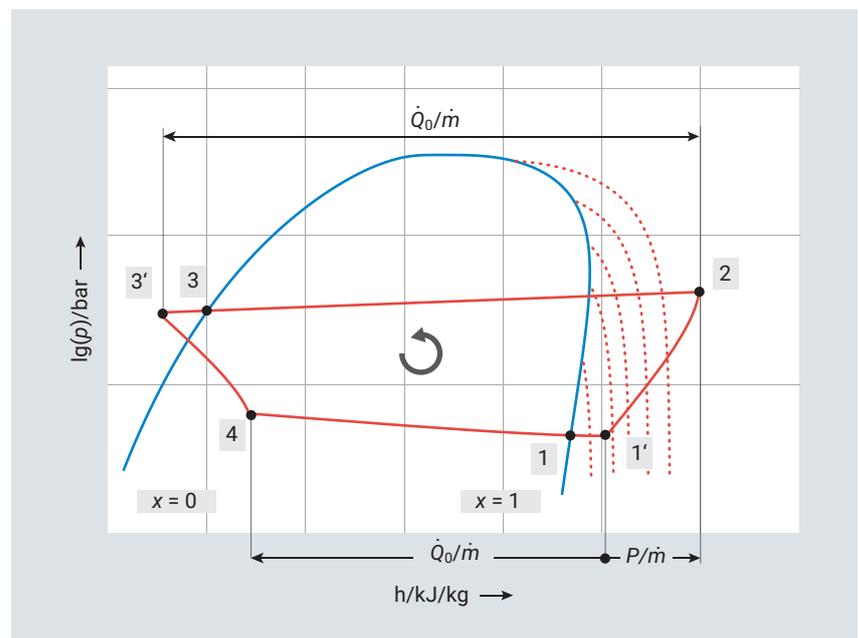


Bild 2. Realer Wärmepumpenprozess

ders gute Voraussetzungen, da am geplanten Standort der Wärmepumpe bereits ein BHKW betrieben wird. Durch die vorhandene Infrastruktur ist eine einfache Anbindung an das Wärmenetz möglich. Viel wichtiger ist aber die Möglichkeit, die Wärmepumpe direkt mit Strom aus dem BHKW zu versor-

gen, um die Zulagen beim Strompreis zu eliminieren.

Neben den durch die Eigenversorgung reduzierten Stromkosten ergeben sich durch den kombinierten Betrieb von Wärmepumpe und BHKW weitere Freiheitsgrade in puncto der realisierbaren Betriebspunkte. So kann bei geringem Bör-

senstrompreis und gleichzeitig hoher Wärmelast die Wärmenetzeinspeisung am Standort maximiert werden. Ebenso ist bei potenziell zukünftig geringen Börsenstrompreisen eine Wärmeerzeugung mit der Wärmepumpe auch ohne kombinierten Betrieb mit BHKW möglich. Die flexible Betriebsweise und die damit verbundene Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen ist Gegenstand eines weiteren Forschungsprojekts.

### Mess- und Monitoringprogramm zur Betriebsüberwachung und -optimierung

Im Rahmen einer wissenschaftlichen Begleitung wurde vom Lehrstuhl Energietechnik der Universität Duisburg-Essen und der Lagom-Energy GmbH ein Monitoring für die Betriebszeit von Oktober 2019 bis Juli 2020 durchgeführt. So werden an verschiedenen Stellen sowohl auf Seiten der Wärmequelle als auch der Wärmesenke Werte wie Temperaturen, Drücke, Durchflüsse usw. mit einer Auflösung von bis zu 5 s aufgenommen. Ebenso werden die thermische Nutzleistung, die elektrische Leistungsaufnahme und der resultierende COP hochauflösend dargestellt. Über ein selbst entwickeltes, python-basiertes Programm kann die Vielzahl an Daten in beliebige Auflösungen überführt und anschließend grafisch dargestellt und ausgewertet werden.

Bild 3 zeigt die Klärwassertemperatur sowie den COP für einen Zeitraum von drei Tagen je Anfang Januar und Anfang Mai. Der Übersichtlichkeit halber wurden aus den hochaufgelösten Messwerten Werte in stündlicher Auflösung erzeugt. Es wird deutlich, dass die Temperatur der Wärmequelle im Mai im Mittel die Temperatur im Januar um knapp 2,6 °C übersteigt. Da auf diese Weise der durch die Wärmepumpe zu leistende Tempe-

raturhub verringert wird, kann ein höherer COP erzielt werden (im betrachteten Zeitraum um knapp 8,5%). Ebenso lässt sich anhand von Bild 3 erkennen, dass die Temperatur der Wärmequelle, trotz Verlusten in der Zulaufleitung von Klärwerk zur Wärmepumpe, im Januar nur selten unterhalb von 11 °C liegt und in den Sommermonaten mit steigender Außentemperatur deutlich steigt. Demnach eignet sich das Abwasser von Kläranlagen gut als erneuerbare Wärmequelle zur Einbindung in ein Wärmenetz.

Bei einer langfristigen Betrachtung konnte festgestellt werden, dass die thermische Nutzleistung der Wärmepumpe mit zunehmender Betriebsdauer abnahm. Grund hierfür war eine bei der Planung nicht absehbare Verschmutzung des Verdampfers durch das gereinigte Klärwasser, in dem auch nach dem Klärprozess neben Eisenphosphat noch weitere biologische Schwebstoffe enthalten waren. Durch die Verringerung der effektiven Wärmeübertragerfläche sank ebenfalls die thermische Leistung. Mit dieser Erkenntnis konnte die Dauer eines planmäßigen Umbaus des Klärwerks in den Sommermo-

naten genutzt werden, um entsprechende Filteranlagen zu testen und nachzurüsten.

### Betriebssimulation zur Ableitung von Optimierungsmaßnahmen

Um Optimierungsmöglichkeiten ableiten zu können, wurde im Rahmen des Mess- und Monitoringprogramms ein digitales Modell der Wärmepumpe für anschließende Betriebssimulationen erarbeitet. Hierbei konnten die einzelnen Komponenten realitätsnah abgebildet werden, wodurch die verfahrenstechnischen und thermodynamischen Vorgänge innerhalb der Wärmepumpe in die Simulation einfließen können.

Bei Betrachtung der bereits in Betrieb genommenen Anlage ergeben sich nur drei Optimierungsmöglichkeiten, die ohne einen Umbau der Anlage gehoben werden können. Auf der Fernwärmeseite bietet sich die Absenkung der Vorlauftemperatur an, wodurch der durch die Wärmepumpe zu leistende Temperaturhub sinkt (Optimierungsansatz 1). Ebenso kann die Rate der Vorlaufrückführung, mit der die Wärmenetzzücklauftempe-

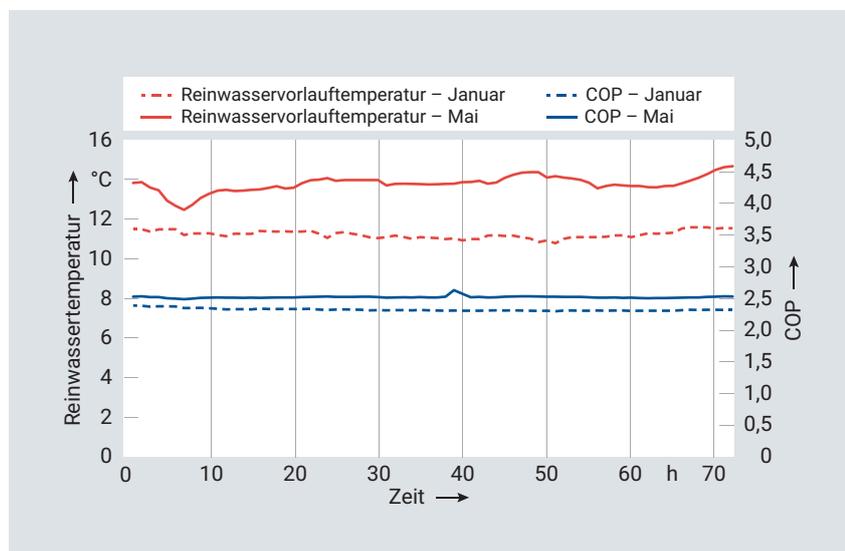


Bild 3. Auswertung von drei Januar- und Maitagen

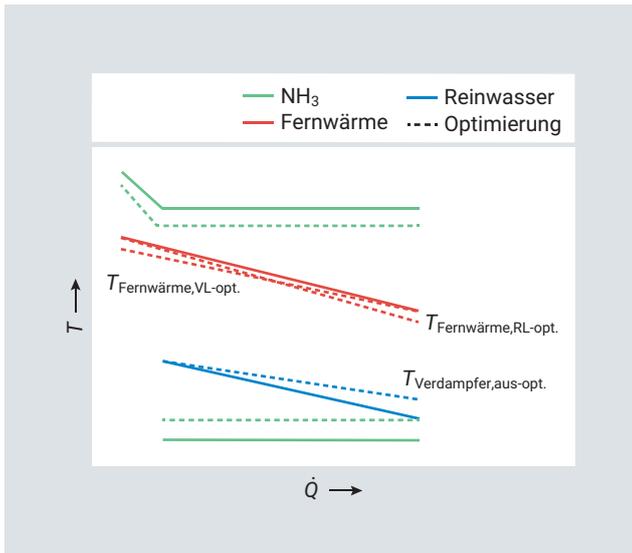


Bild 4. Betrachtete Optimierungsansätze im  $T$ - $\dot{Q}$ -Diagramm

ratur vor Eintritt in die Wärmepumpe zur Sicherstellung einer konstanten Temperatur angehoben werden soll, reduziert werden (Optimierungsansatz 2). Auf der Reinwasserseite stellt abschließend der Volumenstrom des Reinwassers im Verdampfer den einzigen Freiheitsgrad dar (Optimierungsansatz 3).

Die Auswirkungen der drei Optimierungsansätze sind im  $T$ - $\dot{Q}$ -Diagramm in Bild 4 dargestellt. Wird die Netzvorlauftemperatur und damit der durch die Wärmepumpe zu leistende Temperaturhub abgesenkt (Optimierungsansatz 1), so kann ebenfalls eine geringere Kondensationstemperatur gewählt werden. Diese wirkt sich wiederum durch einen daraus resultierenden geringeren Kondensationsdruck und somit ein geringeres Verdichtungsverhältnis positiv auf die elektrische Leistungsaufnahme des Verdichters aus.

Durch die im Rahmen von Optimierungsansatz 2 betrachtete Reduktion der Fernwärmeeintrittstemperatur in den Kondensator bei gleichzeitig konstanter Austrittstemperatur ist bei gleicher Grädigkeit im Kondensator ein geringerer Eintrittsdruck des Kältemittels

möglich. Auf diese Weise kann ebenfalls das Verdichtungsverhältnis verringert werden, was erneut die Leistungsaufnahme des Verdichters reduziert und damit den COP der Wärmepumpe steigert.

Im Rahmen von Optimierungsansatz 3 soll die Wärmequelle betrachtet werden. Wird der Reinwasservolumenstrom erhöht, so sinkt bei gleicher Leistung die Abkühlendifferenz im Verdampfer, was in einem höheren Austrittsdruck des Kältemittels resultiert. Demnach kann

erneut das Verdichtungsverhältnis optimiert werden, wobei im Gegensatz zur Reduktion des Austrittsdrucks in diesem Fall ein erhöhter Eintrittsdruck vorliegt. Bei diesem Optimierungsansatz ist jedoch die damit einhergehende höhere Leistungsaufnahme der Reinwasserpumpe zwingend zu berücksichtigen.

Zwar konnten Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt werden, allerdings lagen bei den Ansätzen 2 und 3 die Auswirkungen auf den COP in einem Bereich von weniger als 1 %. Demnach lässt sich festhalten, dass die Großwärmepumpe in Lemgo nahezu optimal betrieben wird. Einen deutlich größeren Hebel weist die Absenkung der Wärmenetzvorlauftemperatur auf. Der mit der Wärmewende einhergehende Trend zur Absenkung der Netztemperaturen, der in Zukunft auch im Rahmen der Bundesförderung Effiziente Wärmenetze im Bestand klar angegangen werden soll, führt zu einem deutlich effizienteren Betrieb von Großwärmepumpen zur Nutzung von Niedertemperaturwärmequellen, was einen Anstieg des COP je nach gewählter Netzvor-

lauftemperatur von bis zu 10 % gezeigt hat (Optimierungsansatz 1). Da für alle Optimierungsansätze jedoch kein finanzieller Aufwand nötig ist, bietet sich die Umsetzung dennoch an. Vor allem bei einer hohen Anzahl an jährlichen Betriebsstunden können bereits geringe Effizienzsteigerungen mit großen finanziellen Einsparungen einhergehen.

Durch den Wärmepumpenbetrieb konnten im Vergleich zum vorherigen Wärmeerzeugungsmix der Stadtwerke Lemgo bereits im November und Dezember 2019 über 1000 t CO<sub>2</sub> eingespart werden. Die genaue Berechnung der Einsparung sowie die Betrachtung weiterer Optimierungsmöglichkeiten unter Berücksichtigung des gesamten Anlagenparks der Stadtwerke Lemgo sind Gegenstand eines weiteren Forschungsprojekts, dessen Ergebnisse Ende 2021 erwartet werden.

---

Dr.-Ing. Nicolas Witte-Humperdinck,  
Florian Nigbur  
Lagom-Energy GmbH  
witte@lagom.energy  
nigbur@lagom.energy  
[www.lagom.energy](http://www.lagom.energy)

---

Christian Thommessen,  
Jan Scheipers  
Lehrstuhl Energietechnik,  
Universität Duisburg-Essen  
christian.thommessen@uni-due.de  
jan.scheipers@uni-due.de  
[www.uni-due.de](http://www.uni-due.de)

---

Uwe Weber  
Stadtwerke Lemgo GmbH  
weber@stadtwerke-lemgo.de  
[www.stadtwerke-lemgo.de](http://www.stadtwerke-lemgo.de)

---

Ellen Claudia Rupprath  
RWTH Aachen  
ellen.rupprath@rwth-aachen.de  
[www.rwth-aachen.de](http://www.rwth-aachen.de)