Innovative Wärme- und Kältekonzepte auf Kläranlagen

Ralf Mitsdoerffer, München

1 Einleitung

Bei der heute schon intensiv geführten Diskussion zum Stromverbrauch einer Kläranlage wird das Einsparpotenzial beim Wärmebedarf oft vernachlässigt. Eine nachhaltige Energieproduktion und -nutzung bedingt neben einer Senkung des Verbrauchs die effiziente Verwendung der dabei entstehenden Wärme. Diese Wärme sollte nicht möglichst kostengünstig entsorgt, d.h. an die Atmosphäre abgegeben, werden, sondern ist einer sinnvollen Verwertung zuzuführen. Die Nutzungsmöglichkeiten reichen von der direkten Nutzung zu Heiz- oder Kühlzwecken bis hin zur Umwandlung in andere Energieformen.

Kläranlagen haben einen Wärmebedarf beispielsweise für die Beheizung von Betriebsgebäuden oder von Faulbehältern. Darüber hinaus nimmt der Bedarf an Kühlleistung für Schaltanlagen, Serverräume und Betriebsgebäude zu. Kläranlagen sind gleichzeitig Wärmeproduzenten. Bei Anlagen mit anaerober Schlammstabilisierung und anschließender Faulgasverstromung fällt Abwärme aus dem Verbrennungsprozess an. Weitere Potenziale bieten die Nutzung von Wärme aus Abwasser oder von Motorenabwärme.

Kläranlagen haben also beste Voraussetzungen neben der Substitution fossiler Energieträger durch die Faulgasverstromung einen Beitrag zum Klimaschutz durch gezielte Nutzung der produzierten Wärme zu erhöhen. Dazu muss aber das Thema Wärme als Energieform in Konzepte und zukünftige Planungen einbezogen werden.

Im Vergleich zur elektrischen Energie sind die konzeptionellen Betrachtungen des Wärmehaushaltes deutlich komplexer, da neben der Wärmemenge auch das Temperaturniveau der Wärmeguelle und -senke eine wesentliche Rolle spielt.

Der Fachausschuss KEK 10 "Energie in der Wasser- und Abfallwirtschaft" hat die Arbeitsgruppe KEK-10.4 "Wärme- und Kältekonzepte auf Kläranlagen" gegründet mit dem Ziel, das Fachwissen in diesem wichtigen Teilbereich der Energieproduktion und der Energienutzung mit dem Fokus Wärme und Kälte zu bündeln.

Ein erster Arbeitsbericht in der Korrespondenz Abwasser [KA 08/16] soll dazu animieren, Wärme- und Kälteanwendungen systematisch zu erfassen und standortspezifisch zu bewerten. Im nachfolgenden werden die bisherigen Arbeitsergebnisse der Arbeitsgruppe KEK 10.4 zusammenfassend vorgestellt.

2 Vernachlässigung von Wärme- und Kältekonzepten

Der Energiebedarf von Kläranlagen kann insbesondere mit den Energieformen Strom und Wärme beschrieben werden. Selbstverständlich sind andere Formen wie die Bio-Energie, die organische Verschmutzung im Abwasser, die Abwasserwärme im Zulauf oder die solare Einstrahlung, die Geothermie bzw. die Windenergie bei der Bilanzierung des Energiehaushaltes einer Kläranlage zu berücksichtigen.

Vergleicht man die wichtigsten Energieformen "Strom und Wärme" auf Kläranlagen, so ergeben sich die in der Tab. 1 aufgeführten Unterschiede, die auch die bisherige Vernachlässigung bzw. die Optimierung des Wärmehaushaltes begründet.

Tabelle 1: Vergleich zum Strom- und Wärmebedarf von Kläranlagen

	Strom	Wärme
Qualität (Bezug)	konstant	unterschiedliches Tempe- raturniveau je nach Wär- mequelle und –senke
Quantität (je nach Verfah- renstechnik und Anlagen- größe)	25 – 40 kWh/(E x a)	30 – 80 kWh/(E x a)
Verbraucherstandort	punktuell an der Ma- schine	teilweise diffus
Jahresgang	relativ gleichmäßig	extremer Jahresgang
Eigenbedarfsdeckung je nach Verfahrenstechnik und Schlammbehandlungsver- fahren	60 – 75 %	50 – 150%
Energiepreis je nach Bezug (fremd-eigen)	0,03 bis 0,25 €/kWh	0,01 bis 0,09 €/kWh

Die Gründe für ein vernachlässigtes Wärmemanagement sind insbesondere aufgrund der nachfolgend aufgeführten Punkten gegeben:

- der schwankende und nicht exakt bekannte Jahresgang des Wärmebedarfs
- Fehlende Kenntnisse zu den Abhängigkeiten von Wärmequelle und -senke
- die Wärmeerzeugung, die strom- bzw. gasgeführt ist und nicht wärmegeführt angedacht wird
- die stromoptimierte Energieerzeugung (BHKW)
- der vermeintlich niedrige Wärmepreis
- die innovativen Technologien, die sich teilweise noch im Entwicklungsstadium befinden

3 Wärme auf Kläranlagen

Im Gegensatz zum Stromhaushalt einer Kläranlage ist der Wärmehaushalt eine Funktion des Wärmebedarfs, der Wärmeerzeugung sowie der Abwärmenutzung. Die Herangehensweisen von thermischer und elektrischer Anlagenoptimierung unterscheiden sich erheblich voneinander.

3.1 Wärmebedarf

Der Wärmebedarf ist insbesondere bedingt durch:

- die Rohschlammerwärmung
- die Transmissionsverluste bzw. Isolierung von
 - Gebäuden
 - Faulbehältern
- die Warmwasseraufbereitung
- die weitergehenden Schlammbehandlungsverfahren wie
 - thermische Schlammdesintegration
 - Schlammtrocknung
 - thermische Schlammverwertung (Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse)

Die nachfolgende Abbildung zeigt, dass für die Rohschlammerwärmung der größte Wärmebedarf anfällt.

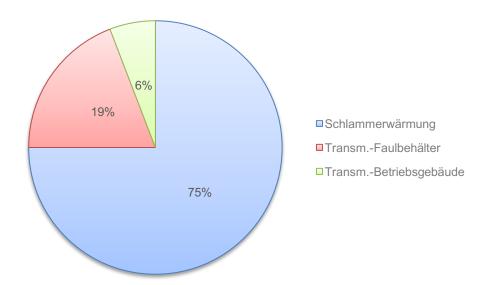


Abb. 1: Wärmebedarf im Jahresmittel einer Modellanlage ohne thermische Schlammbehandlung

Weitere Einflussfaktoren auf den Wärmebedarf haben aber auch

- die Faulbehältergröße,
- die Effizienz der Energieerzeuger,
- die Abstimmung von Energieerzeugung und Wärmebedarf (Wärmequelle Wärmesenke) bzw. die Nutzung von Abwärme,
- die Verfahrenstechnik der Abwasserreinigung und
- die Qualität der Schlammentwässerung.

Der Wärmebedarf einer Kläranlage schwankt über das Jahr erheblich. In der Abbildung 2 ist der Jahresgang eine Modellanlage dargestellt. Diese Anlage zeichnet sich aus durch eine Schlammverweilzeit von 20 Tagen, einer Faulraumtemperatur von 35°, einer mittelmäßigen Bauwerksisolierung (U = 0.3-0.5 W/(m²xK), einer primär Schlammeindickung von 3 %-TR für den Rohschlamm und 5 %-TR für den Überschussschlamm. Ersichtlich ist, dass der Energiebedarf im Sommer nur knapp 70 % des Energiebedarfs im Winter ausmacht. Bedingt ist dies durch die Außentemperatur sowie die unterschiedlichen Rohschlammtemperaturen im Sommer und Winter.

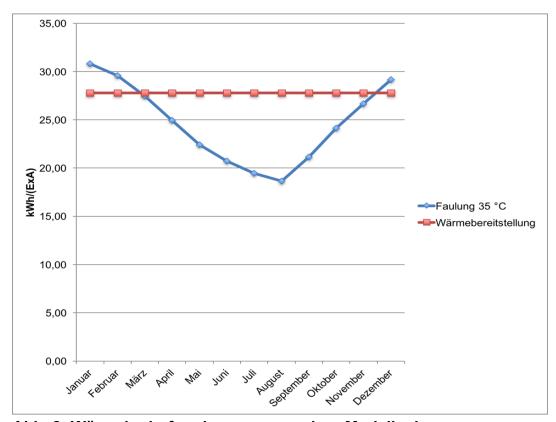


Abb. 2: Wärmebedarf und -erzeugung einer Modellanlage

3.2 Wärmeerzeugung

Zur Wärmeerzeugung bzw. für die Wärmebedarfsdeckung werden in der Regel Blockheizkraftwerke (BHKW), Gas- oder Ölbrenner sowie Elektroheizungen eingesetzt.

Als Energiequelle zur Wärmeerzeugung werden meistens Faulgas, manchmal auch Erdgas, Strom oder Abwärme z. B. der Gebläse genutzt. Weiterhin besteht die mögliche Nutzung von Solarthermie, Photovoltaik oder Abwasserwärme.

Unter den gängigen Voraussetzungen für eine konventionelle, kommunale Kläranlage kann mit dem entstehenden Faulgas maximal 29 kWh/(E·a) Wärme erzeugt werden (Kennwerte einer Modellanlage). Unter der Voraussetzung, dass keine Abwärmenutzung erfolgt ergibt sich entsprechend Abbildung 2 ein Wärmeüberschuss von März bis November. In den Monaten Dezember bis Februar muss jedoch zugeheizt werden.

3.3 Abwärmenutzung

Wärme kann unter der Voraussetzung, dass die Wärmequelle und die Wärmesenke aufeinander abgestimmt sind, mehrfach genutzt werden. Wird zum Beispiel die Wärme des Faulschlamms genutzt, um den Rohschlamm vorzuwärmen, so kann über das ganze Jahr ein Wärmeüberschuss (s. Abbildung 3) vorausgesetzt werden.

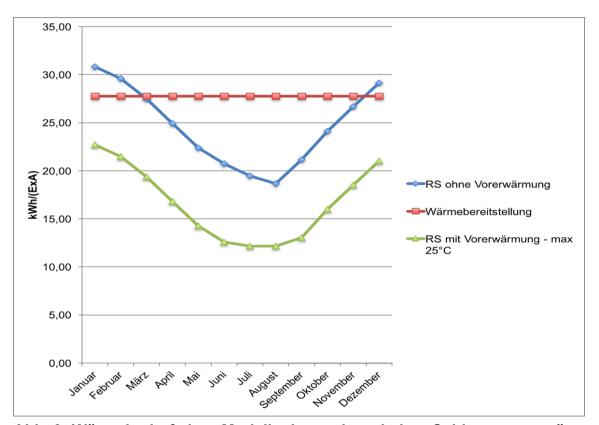


Abb. 3: Wärmebedarf einer Modellanlage mit und ohne Schlammvorerwärmung

Entsprechend ist die Mehrfachnutzung von Wärme bzw. die kaskadierte Wärmenutzung (siehe Seite 13) oftmals sinnvoll und wirtschaftlich.

4 Vorgehensweise zur Einführung eines Wärme- bzw. Kältekonzepts

Zur Nachhaltigkeit von wärmetechnischen Optimierungsmaßnahmen sollte nicht nur ein Wärme- bzw. Kältekonzept erstellt werden, sondern ein Wärmemanagementsystem eingeführt werden, das einerseits ein Wärme- bzw. Kältekonzept beinhaltet und einen automatischen Mechanismus zur kontinuierlichen Weiterentwicklung enthält. Mit einem solchen System wird die Nachhaltigkeit zu einem minimierten Energieeinsatz garantiert.

Vor Einführung eines Wärmemanagements ist ein grober Anlagencheck bezüglich des Energiebedarfs durchzuführen, um den anlagenspezifischen Handlungsbedarf abzuschätzen. Insbesondere ist dabei der Fokus auf die Energiebedarfsdeckung zu lenken. In der nachfolgenden Tabelle sind die verschiedenen Anlagensituationen bezüglich Energiebedarfsdeckung dargestellt.

Tabelle 2: Handlungsbedarf von Kläranlagen

Fall	Deckungsgrad		Handlungsbedarf	
	Strom	Wärme		
1	>100%	>100%	geringer/kein Handlungsbedarf	
2	>100%	<100%	Wärmebedarf reduzieren weitergehende Wärmenutzung	
3	<100%	>100%	Strombedarf reduzieren Strom mittels Wärme substituieren	
4	<100%	<100%	Strombedarf reduzieren Wärmebedarf reduzieren weitergehende Wärmenutzung	

Rund 95 % der Kläranlagen müssen externe Energie für die Strombedarfsdeckung und rund 40 % der Anlagen für die Wärmebedarfsdeckung beziehen (s. Fall 3 und 4) [1].

Anlagen, die entsprechend den Fällen 2 und 4 einzuordnen sind, sollten ein Wärmemanagementsystem einführen, um den externen Energiebezug bezüglich der Wärmebedarfsdeckung und somit die Betriebskosten zu reduzieren.

Aber auch Anlagen, die den Fällen 1 und 3 zuzurechnen sind und einen Wärmeüberschuss aufweisen, sollten gegebenenfalls zusätzlich wärmetechnisch optimiert werden. Mit einem maximierten Wärmeüberschuss besteht die Möglichkeit die Anlage verfahrenstechnisch weitergehend zu optimieren und Strom mittels Wärme zu substituieren.

Die einzelnen Arbeitsschritte zur Umsetzung eines Wärmemanagements sind der nachfolgenden Grafik zu entnehmen. Zur Nachhaltigkeit eines Wärmemanagements sollte der gesamte Zyklus regelmäßig durchlaufen werden.

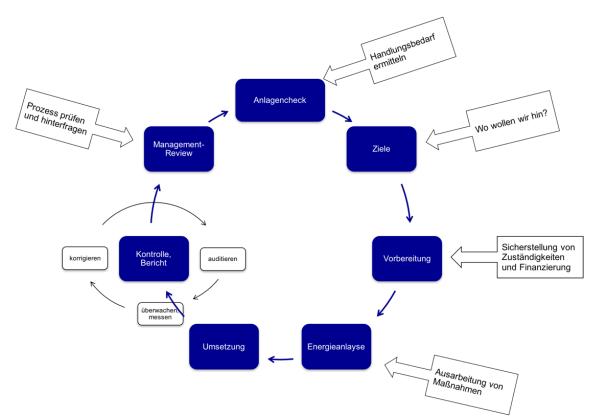


Abb. 4: Wärmemanagementsystem

4.1 Ziele setzen

Nach der groben Abschätzung des Handlungsbedarfs (siehe Tabelle 2) sind die weitergehenden Ziele des Wärmemanagements zu definieren. Diese bestimmen die Detailtiefe der späteren Bestandsaufnahme und die Entwicklung von Maßnahmen. Beispiele von Zielen können sein:

- Minimierung des externen Wärme-Energiebezugs
- Abwärmeströme nutzen
- Versorgungssicherheit überprüfen
- Synergien für die Bereiche Wärme-Strom-Schlammbehandlung-Kläranlagenumfeld definieren
- Potenziale f
 ür die verfahrenstechnische Optimierung aufdecken
- wärmeautarke Kläranlage erreichen
- Substitution von Strom mittels Wärme

4.2 Vorbereitung zur Umsetzung

Nach der Festlegung der Ziele sind vor der eigentlichen Umsetzung der Maßnahme die Finanzierung des Gesamtpakets abzusichern, die Zuständigkeiten der Beteiligten festzulegen sowie die entsprechenden Ressourcen freizustellen.

4.3 Energieanalyse

Die konstruktive Umsetzung eines Wärmemanagements, dass eigentliche Wärmeund Kältekonzept, liegt schwerpunktmäßig in der Erstellung einer Energieanalyse, die entsprechend DWA-A 216 [1] nachfolgende Arbeitsschritte umfasst:

- Bestandsaufnahme
 - Erstellung einer Verbrauchermatrix und Energiebilanz des Ist-Zustandes
 - · Ermittlung von Wärmebedarf und -erzeugung
- Aufstellung einer Energiebilanz des Ist-Zustandes
- Bestimmung der anlagenbezogenen Idealwerte
- Bewertung des Ist-Zustandes und Identifizierung von Maßnahmen
- Ermittlung des Einsparpotenzials und der Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen
- Bildung von Maßnahmenpaketen und Vorgabe der zeitlichen Umsetzung
- Berichterstattung

Einzelheiten zu den Arbeitsabläufen bzw. –inhalten der verschiedenen Arbeitsschritte sind dem Arbeitsblatt der DWA–A 216 [1] in einzelnen zu entnehmen. Ebenso sind in diesem Arbeitsblatt Hinweise zur Qualität, des Umfangs der Energieanalyse sowie die Voraussetzung für die notwendigen Ingenieurleistungen gegeben. Beispiel zu möglichen Optimierungsmaßnahmen werden in Kapitel 5 gegeben.

4.4 Umsetzung der Maßnahmen

Nach der Festlegung der wirtschaftlichen Optimierungsmaßnahmen und der zeitlichen Umsetzung (siehe Ziffer 4.3) sind mit dem entsprechenden Fachpersonal die geplanten Maßnahmen umzusetzen.

4.5 Kontrolle und Berichterstattung

Schließlich sind nach Inbetriebnahme die Ergebnisse der Optimierungsmaßnahmen anhand der in der Planung genannten Kennwerte zu evaluieren. Ein Bericht ist zu erstellen und den Verantwortlichen zur Prüfung vorzulegen.

4.6 Review

Die Verantwortlichen sollten unter Berücksichtigung des Kontroll-Berichts und des erneuten Anlagenchecks die Ziele (siehe Ziffer 3.1) des nächsten Zyklus anpassen und gegebenenfalls Nachbesserungsmaßnahmen veranlassen.

5 Beispiele zur thermischen Anlagenoptimierung

Im Fokus einer Energieanalyse (siehe Kapitel 4.3) steht die Entwicklung von Optimierungsmaßnahmen. Schrittweise sollten dabei die nachfolgend aufgeführten Schwerpunkte untersucht werden:

- Reduzierung des Wärmeverbrauchs
- Erhöhung des Wärmenutzungsgrades
- Technologien für Wärmenutzung und Kälteerzeugung

5.1 Reduzierung des Wärmeverbrauchs

Der Abbildung 1 ist zu entnehmen, dass rund 75 % des Wärmebedarfs für die Rohschlammerwärmung benötigt wird. Diese Größe steht insbesondere in Abhängigkeit der Rohschlammmenge sowie der Faulraumtemperatur. Dementsprechend ist der Fokus auf diese beiden Parameter zu legen.

Einsparungen sind mit der Erhöhung des Eindickgrades von Primär- und Überschussschlammes zu realisieren. Die nachfolgende Abbildung stellt beispielhaft den Unterschied zwischen einer Überschussschlamm-Eindickung von 5,0 %-TR und 6,5 %-TR dar.

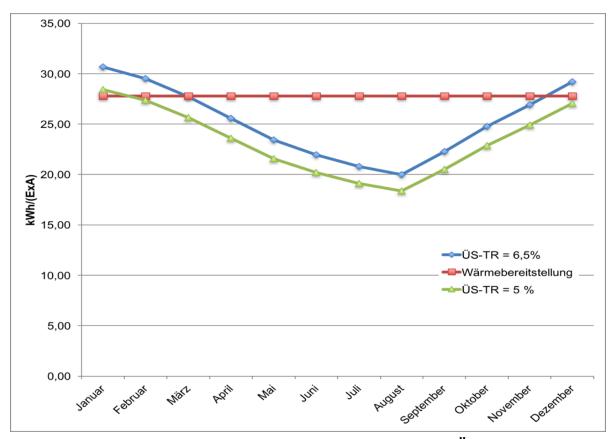


Abb. 5: Wärmebedarf der Kläranlage bei unterschiedlicher ÜS-Eindickung

Würde in den Wintermonaten der Eindickgrad entsprechend auf 6,5 %TR durch Anpassung der Flockungshilfsmittel-Menge erhöht, wäre die Modellanlage weitgehend wärmeautark. Bei Kläranlagen mit anschließender Trocknung wird der Wärmebedarf durch eine verbesserte Entwässerung zudem erheblich gesenkt.

Aber auch mit der Reduzierung der Faulraumtemperatur ist eine Bedarfsreduzierung realisierbar (siehe nachfolgende Abbildung).

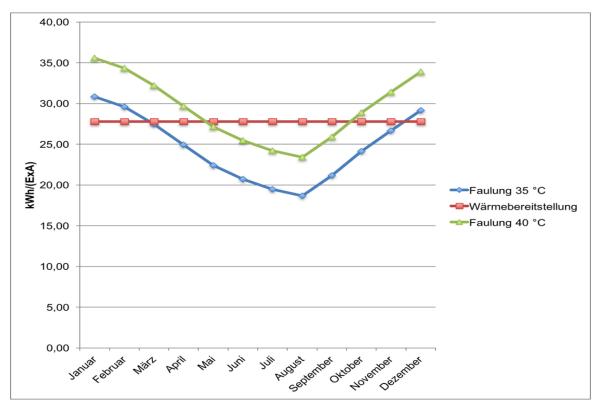


Abb. 6: Wärmebedarf bei unterschiedlichen Faulraumtemperaturen

Wird zum Beispiel die Reaktortemperatur von 40°C auf 35°C gesenkt, so reduziert sich der Wärmebedarf der Gesamtanlage um 12 %. Zu beachten ist für diesen Fall eine mögliche Verringerung der Faulgasproduktion und damit der Eigenwärmeerzeugung. Dies ist im laufenden Betrieb zu beobachten, um ggf. mit einer entsprechenden Temperaturerhöhung gegenzusteuern.

Neben der wärmetechnischen Optimierung der Faulung bzw. der Schlammentwässerung bieten sich eine Reihe von weiteren Maßnahmen zur Energieeinsparung an:

- Wärmedämmung der Gebäudehülle (Fenster, Wände, Dach),
- Heizungssanierung durch Einsatz von Niedertemperatur
 – oder Brennwertkesseln, Wärmepumpen und Solarthermie sowie einer Optimierung der Steuer
 – und Regeltechnik (Einbau von witterungs- und zeitgesteuerten Heizungsreglern).
- Senkung der Lüftungswärmeverluste durch Optimierung von technischen Lüftungsanlagen zum Beispiel durch Überprüfung der Luftmenge und Luftqualitätsregelung sowie Einsatz von Lüftungsanlagen mit effizienter Wärmerückgewinnung,
- Bedarfsgerechte Regelung von Heizung und Lüftung (Zeitregime, Sommer-Winter-Umschaltung) und
- Einbindung der Heizungsansteuerung und Heizungsregelung in das Prozessleitsystem bzw. die Steuerungen.

5.2 Erhöhung des Wärmenutzungsgrades

Der Wärme- und Kältebedarf unterliegt üblicherweise Schwankungen, die sich in ausgeprägten Ganglinien (Tag und Jahr) widerspiegeln. Häufig erfolgt die Bereitstellung von Wärme und Kälte als Nebenprodukt eines thermischen Prozesses, wie zum Beispiel der Stromerzeugung mittels BHKW und ist daher nicht bedarfsgerecht. Sofern Wärmequelle und -senke aufeinander abgestimmt sind, weist Wärme gegenüber Strom jedoch den Vorteil der Mehrfachnutzung auf.

Zur Erhöhung des Wärmenutzungsgrades werden daher die drei nachfolgend aufgeführten Bereiche näher betrachtet.

- Wärmespeicher
- Lastenmanagement
- Kaskadierte Wärmenutzung (Mehrfachnutzung)

Wärmespeicher

Mittels Wärmespeicher lassen sich Wärmebedarf von der -erzeugung entkoppeln. Zu unterscheiden ist zwischen den nachfolgend aufgeführten Wärmespeichertypen, die teilweise eine erheblich unterschiedliche Wärmekapazität aber auch Temperaturniveaus aufweisen.

- 1. Sensible Wärmespeicher (Wasser / Schlamm)
- 2. Latente Wärmespeicher (Paraffin / Salzhydrate)
- 3. Chemisch-sorptive Wärmespeicher (Zeolithe / Salze)

Sensible Wärmespeicher wie der Wasserspeicher, der nur eine geringe Speicherkapazität besitzt (ca. 60 kWh/m³), werden bereits vielfach schon auf Kläranlagen eingesetzt. Insbesondere ist der Faulbehälter mit seinem großem Volumen diesem Speichertyp zuzurechnen. Der Temperaturbereich des sensiblen Wasserspeichers liegt im Bereich von 35 bis 90° Grad.

Die latenten Wärmespeicher arbeiten in der Regel im Temperaturbereich von 30 bis 80 °Celsius. Im Vergleich zum Wasserspeicher ist die Wärmespeicherkapazität in etwa doppelt so groß (120 kWh/m³). Latente Wärmespeicher zeichnen sich durch einen Wechsel des Aggregatzustands (fest-flüssig) aus.

Die chemisch-sorptiven Wärmespeicher können je nach Arbeitsmedium für den Temperaturbereich von 100 bis 500 °C eingesetzt werden. Die Speicherkapazität kann bis zu 500 kWh/m³ betragen. Vorteil des chemisch-sorptiven Wärmespeicher ist zudem der geringe Standzeitverlust, da Transmissionsverluste hierbei nicht relevant sind. Anzumerken ist, dass die Entwicklung dieser Wärmespeicher derzeit intensiviert wird und erwartet werden kann, dass kurzfristig neue Möglichkeiten zum Einsatz dieser Technologie der Fachwelt vorgestellt werden. Ein Beispiel ist der NAOH-Speicher, der Firma Nacompex, mit dem man in Verbindung mit einem Blockheizkraftwerk sowie einem OCR-Prozess den Wirkungsgrad der Eigenstromproduktion erhöhen will.

Die effektive Nutzung von Wärmespeichern ist immer abhängig von der Abstimmung zwischen Wärmequelle und -senke. Dabei sind insbesondere zu berücksichtigen:

- die erforderliche Speicherkapazität
- das Temperaturniveau von
 - Wärmeguelle
 - Wärmsenke
- die Beladungs- und Entladungszeit

Lastenmanagement

Die Ziele eines betrieblichen Wärmemanagements sind die Erzeugung, die Umwandlung und die Verteilung von Wärme und Kälte zu jedem Zeitpunkt.

Zum Managen der Wärmeströme ist es sinnvoll, beispielsweise auf Prozessleitebene, Bilder zur Visualisierung der Wärme- und Kälteprozesse in Form von Grafiken (Fließschemata, Sankey-Diagramme usw.) sowie Bedienhinweise zur Unterstützung des Entscheidungsprozesses vorzuhalten.

Die Betriebszustände aller beteiligten Komponenten wie Wärmeerzeuger, Wärmeverbraucher, Kühlaggregate sind zu überwachen und Regelparameter zu optimieren. Relevante Daten können sein:

- aktuell erzeugte und verbrauchte Wärme- und Kälteleistungen
- Temperaturniveaus von Stoffströmen, die an der Erzeugung und am Verbrauch von Wärme- und Kälte beteiligt sind (Schlammtemperaturen, Heizwassertemperaturen, Kühlwasser- und Abgastemperatur BHWK, Außenlufttemperatur etc.)
- Bilanzierungen über Produktion und Verbrauch von Wärme- und Kältemengen tages-, monats- und jahresabhängig
- Darstellung von Defiziten und Überschüssen an Wärme und Kälte
- Anteil fossiler (Heizöl, Erdgas) und regenerativer (Faulgas) Primärenergie an der Wärme- und Kälteerzeugung

Die Temperaturniveaus von Wärme- und Kälteprozessen sind zu überprüfen und bei Bedarf anzupassen. Nacht-/ Wochenend-Temperaturabsenkungen in Betriebsgebäuden, Raumtemperaturen in klimatisierten Gebäuden sowie Sommer- und Winterbetriebszustände sind regelmäßig auf ein Optimierungspotential hin zu untersuchen. Die Reihenfolge der Versorgung von verschiedenen Verbrauchern (Faulbehälter, Betriebsgebäude sowie Warmwasser oder Wärmeverkauf) sollte je nach Priorität und Wärmebedarf reguliert werden.

Sind mehrere Alternativen zur Erzeugung von Wärme bzw. Kälte installiert, sollte der wirtschaftlichste Betriebszustand gewählt werden, wobei die Abhängigkeiten häufig sehr komplex werden können. Die gezielte Bewirtschaftung von Wärmespeichern, Faulgasspeichern und Co-Substraten kann einen wesentlichen Beitrag zum Wärmelastmanagement liefern.

Die Wärmeproduktion beispielsweise bei BHKW-Anlagen ist mit der Stromproduktion gekoppelt, so dass beide Prozesse in Konkurrenz stehen. Daher sind Entscheidungen selten eindeutig und können möglicherweise erst nach intensiver Betrachtung getroffen werden. Eine Auswertung typischer Szenarien zur Ermittlung von Prämissen ist vielfach erforderlich.

Kaskadierte Wärmenutzung (Mehrfachnutzung)

Wärme kann auf unterschiedlichen Temperaturniveaus mehrfach genutzt und quasi vom höchsten zum niedrigsten Exergieniveau schrittweise "entwertet" werden. Bei einer Mehrfachverwendung ist die Abwärme eines Mediums (Senke) gleichzeitig die Heizwärme (Quelle) für den nächsten Nutzungsschritt. Als Synonym hierfür kann der Begriff der "kaskadierten Wärmenutzung" verwendet werden.

Dabei kann z.B. die Abwärme aus einem BHKW eine Klärschlamm-Trocknung beheizen. Die Brüden der Trocknung können wiederum einen Faulbehälter oder das Betriebsgebäude erwärmen. Am Ende der technischen Nutzungskette wird immer ein Wärmestrom an die Umgebung abgegeben.

Analog gilt die kaskadierte Nutzung auch für Kälteanwendungen, wobei das Temperaturniveau in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen wird.

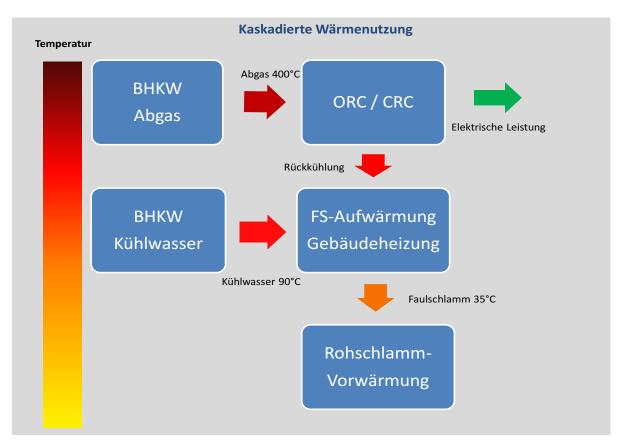


Abb. 7: Kaskadierte Wärmenutzung, entnommen aus [2]

5.3 Technologien für Wärmenutzung und Kälteerzeugung

Sind alle thermischen Potenziale zur Einsparung und Effizienzsteigerung ausgeschöpft und gibt es zumindest in der wärmeren Jahreszeit einen Wärmeüberschuss (Tabelle 2; Fall 1+3), so sind weitergehende Überlegungen zur Nutzung von Wärme anzudenken.

Die technische einfachste Nutzung ist dabei die Übertragung von Wärme zwischen Medien durch einen geeigneten Wärmeüberträger (Wärmetauscher). Darüber hinaus

gibt es die Möglichkeit mittels Wärmepumpe oder Kältemaschine die Wärme auf einem anderen Temperaturniveau zu verwerten. Mittels einer Wärmekraftmaschine kann Wärme auch in elektrische Arbeit umgewandelt werden.

Die wichtigsten Kenngrößen bei der Entscheidung der Wärmenutzungstechnologien sind das Temperaturniveau, die thermische Leistung und die zeitliche Konvergenz der Wärmequelle und der Wärmesenke. Nachfolgende Abbildung 8 gibt Auskunft darüber, welche Technologien bei welchem Temperaturniveau realisierbar sind.

°C	Wärmequellen	Wärmesenken und Nutzungsmöglichkeiten	°C
600	200 – 1.500 °C Abgase aus Vergasungsprozessen (z.B. Verbrennung, Pyrolyse, Mephrec, HTC)	250 - 540 °C Stromerzeugung mittels Dampfprozessen	600
500	150 – 600 °C Abgase aus Verbrennungs- und	125 – 400 °C Verbrennungsluftvorwärmung	500
400	Wärmeprozessen (z.B. BHKW, Mikrogasturbine)	70 - 450°C Stromerzeugung mittels ORC- Verfahren	400
300	100 – 150°C Prozessdampf aus Dampferzeugungsanlagen	125 – 275 °C Trocknungsprozesse	300
200	50 – 100°C Trocknungsanlagen, Drucklufterzeugungsanlagen, Kälteanlagen, Fernwärme	80 – 160 ° C Kälte erz eugung	200
100	20 – 50°C Raumluft, Warmes Abwasser / Kühlwasser, Boden, Solar	75 – 125°C Heizung / Warmwasser, Trocknung	100
	< 20 °C Raumluft, Rohschlamm, Abwasser, Grundwasser	30 – 75 °C Wasservorwärmung, Raumheizung durch Wärmepumpen	

Abb. 8: Wärmequellen und -senken, entnommen aus [2]

Weitergehende Wärmenutzung

Prinzipiell kann die Wärme direkt oder indirekt genutzt werden (siehe Abb. 9). Bei der direkten Nutzung, also dem heutigen Regelbetrieb, wird die Abwärme des BHKW auf einem Temperaturniveau von 80 bis 90°C unmittelbar für die Gebäudeheizung, eine Schlammtrocknung oder eine thermisch/chemische Desintegration genutzt. Bei der indirekten Nutzung wird die Wärme entweder zur Erzeugung von Dampf für eine Desintegration, für die Produktion von Strom oder von Kälte eingesetzt. Auf die verschiedenen Möglichkeiten wird im Folgenden eingegangen.

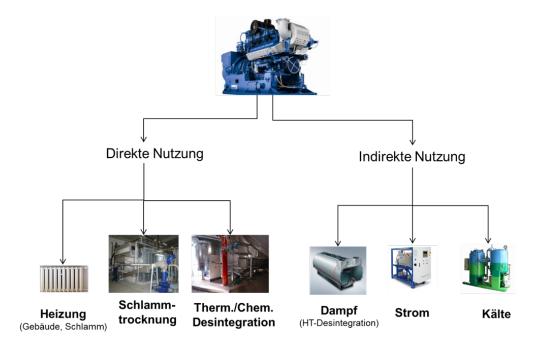


Abb. 9: Möglichkeiten der Abwärmenutzung, entnommen aus [3]

Zur Umwandlung von Abwärme in Strom gibt es verschiedene Verfahren, die im Kern auf einem thermodynamischen Kreisprozess basieren. Hierbei wird Wärmeenergie zunächst in kinetische Energie und anschließend über einen nachgelagerten Generator in elektrische Energie umgewandelt. Einer der bekanntesten Kreisprozesse ist der Clausius-Rankine-Prozess (Clausius-Rankine-Cycle), der die in einem einfachen Dampfkraftwerk ablaufende Energieumwandlung beschreibt.

Der CRC-Prozess zeichnet sich durch 4 periodisch (kreisförmig) hintereinander ablaufende thermodynamische Zustandsänderungen aus (Abb. 10).

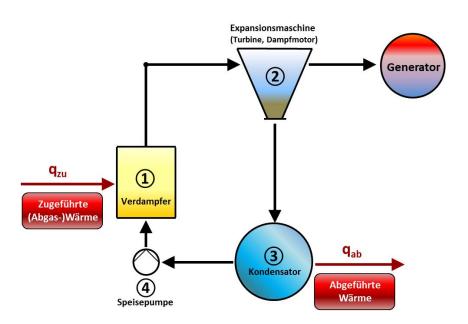


Abb. 10: Clausius-Rankine-Kreisprozess, entnommen aus [3]

Die aus dem o.g. Kreisprozess abgeleiteten, unterschiedlichen Verfahren werden Im Allgemeinen unter dem Begriff OCR (Organic-Rankine-Cycle) zusammengefasst. Abhängig von der Verdampfungstemperatur kann man unterscheiden zwischen:

- 1. Hochtemperatur-ORC (180 270 °C) und
- 2. Niedertemperatur-ORC (65 95 °C).

Niedertemperatur-ORC-Prozesse können bei niedrigen Abwärmetemperaturen (Motorkühlwasser) eingesetzt werden, haben aber den thermodynamischen Nachteil geringer Wirkungsgrade.

Hochtemperatur-ORC-Prozesse bieten neben höheren Wirkungsgraden zudem den Vorteil, dass beim Einsatz im Gasmotorenbereich einerseits der Motorbetrieb und andererseits der ORC-Betrieb weitestgehend voneinander entkoppelt sind. Der Hochtemperatur-ORC kann entweder über eine Direktverdampfung des Arbeitsmittels oder über einen Thermalölzwischenkreislauf realisiert werden. Für den Einsatz an einem Gasmotor bedeutet dies, dass hierfür primär nur die auf hohem Temperaturniveau vorliegende Abgaswärme und nicht die Kühlwasserwärme genutzt wird.

Kälteerzeugung

An verschiedenen Stellen einer Kläranlage besteht zudem ein Kühlbedarf. Dies sind beispielsweise die Räume mit Schaltanlagen und Computern, andere zu klimatisierende Räume sowie Sonderanwendungen wie die Gastrocknung. Üblicherweise werden strombetriebene Kompressionskältemaschinen in Form von dezentralen Kompaktklimaanlagen eingesetzt, in seltenen Fällen auch Kaltwassersätze, die an ein zentrales Kälteverteilnetz angeschlossen sind.

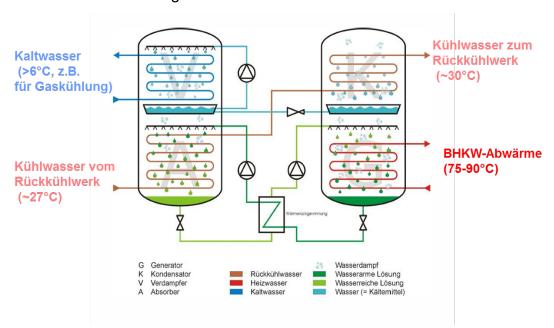


Abb. 11: Funktionsprinzip der Absorptions-Kältemaschine, entnommen aus [3]

Konventionelle Klimaanlagen werden durch eine elektrisch angetriebene mechanische Kompression eines verdampften Kältemittels betrieben. Bei Absorptionskälteanlagen wird dagegen das verdampfte Kältemittel in einem Lösungsmittel absorbiert und anschließend durch eine externe Wärmezufuhr (z.B. BHKW-Abwärme) wieder ver-

dampft. Dadurch kann aus Wärme Kälte erzeugt werden, wobei nur in geringem Umfang elektrische Energie für Pumpvorgänge innerhalb der Absorptionskälteanlage eingesetzt werden muss.

Bei einer Absorptionskälteanlage laufen parallel mehrere Kreisprozesse ab (siehe Abb. 11). Das Kaltwasser wird im Verdampfer erzeugt, in dem ein Kältemittel (z.B. Wasser) im hohen Vakuum verdampft. Dieser Dampf wird im Absorber durch ein Lösungsmittel (z.B. Lithiumbromid) absorbiert und gibt dabei die aufgenommene Wärme ab. Diese Wärme wird über das Kühlwasser abgeführt. Aus dem wasserreichen Lösungsmittel wird über BHKW-Abwärme das Wasser im Generator verdampft, das wasserarme Lösungsmittel kann dann zurück in den Absorber geführt werden. Schließlich muss noch der im Generator entstandene Wasserdampf kondensiert werden, was durch das bereits im Absorber eingesetzte Kühlwasser im Kondensator erfolgt. Dieses Wasser wird anschließend in einem Rückkühlwerk (Luftkühler) gekühlt, um dann in den Absorber zurückgeführt zu werden.

Sowohl das Kälte- als auch das Lösungsmittel werden vollständig im Kreis geführt. Neben der BHKW-Abwärme erfordern die Pumpen den Einsatz elektrischer Energie. Aufgrund der höheren Investitionskosten einer Absorptionskälteanlage ist ein wirtschaftlicher Einsatz dieser Technologie nur unter bestimmten Bedingungen gewährleistet. Neben der kostenfrei zur Verfügung stehenden Abwärme sollte der Kältebedarf möglichst hoch sein und über einen längeren Zeitraum benötigt werden. Neben der Gaskühlung stellen Kältenetze prinzipiell gut geeignete Anwendungsbereiche dar. In den zukünftigen Berichten der Arbeitsgruppe werden neben der verfahrenstechnischen Diskussion auch die Wirtschaftlichkeit dieser Technologien noch näher betrachtet.

6 Zusammenfassung

Die politisch gewollte Energiewende verlangt auch ein Umdenken in der Wasserwirtschaft.

Eine nachhaltige Energienutzung bedingt:

- das Einsparen von Energie,
- deren effiziente Verwendung
- sowie die Substitution fossiler Energieträger.

Bei der heute schon intensiv geführten Diskussion zum Stromverbrauch auf Kläranlagen wird dort das Einsparpotenzial beim Wärmebedarf oft vernachlässigt. Zudem nimmt der Wärme- und Kältebedarf moderner Anlagen stetig zu. So müssen heute beispielsweise aufgrund der höheren Anforderungen an die Betriebsüberwachung und Steuerungstechnik Schaltanlagen, Serverräume und Betriebsgebäude oftmals zusätzlich gekühlt werden.

Zur Umsetzung der Energiewende im Bereich der Abwasserreinigung bzw. zur Minimierung des Energieverbrauchs und insbesondere des Wärmebedarfs kann der Kläranlagenbetreiber auf eine Vielzahl von Wärmequellen und -senken zurückgreifen wie z.B. Bioenergie, Faulgas oder Abwasserwärme.

Wärme- und Kältekonzepte sollten integrale Bestandteile von energetischen Optimierungsmaßnahmen darstellen. Das finale Ziel eines solchen Konzeptes stellt die möglichst vollständige Nutzung der Abwärme für eine wärmeautarke Kläranlage dar. Gegebenenfalls kann mit überschüssiger Abwärme weitergehend der Strombezug reduziert werden.

Zur Umsetzung sind neue Technologien der Energienutzung einzusetzen, die vorhandene Verfahrensführung zu überdenken und umzustellen sowie ein Wärmemanagement einzuführen.

Der Fachausschuss KEK 10 "Energie in der Wasser- und Abfallwirtschaft" hat die Arbeitsgruppe KEK-10.4 "Wärme- und Kältekonzepte auf Kläranlagen" gegründet mit dem Ziel, das Fachwissen in diesem wichtigen Teilbereich der Energieproduktion und der Energienutzung mit dem Fokus Wärme auf Kläranlagen zu bündeln.

Die Gruppe beschäftigt sich vornehmlich mit den Bereichen Wärmebilanzierung, Wärmenutzung und Wärmemanagement. Im Mittelpunkt steht dabei, neben der Darstellung der Grundlagen, die Vorgehensbeschreibung zur Entwicklung von neuen Wärmeund Kältekonzepten, so dass den Betreibern eine Wegbeschreibung und eine Hilfestellung zur thermischen Kläranlagenoptimierung an die Hand gegeben wird. Zudem werden Beispiele für neue Wärme- und Kältekonzepte herausgearbeitet. Die Ergebnisse werden abschließend in einem DWA-Arbeitsbericht veröffentlicht werden.

7 Literatur

- [1] DWA-A 216: Energiecheck und Energieanalyse Instrumente zu einer Energieoptimierung von Abwasseranlagen. Arbeitsblatt, Dezember 2015.
- [2] DWA Arbeitsgruppe KEK 10.4: Arbeitsbericht "Wärme- und Kältekonzepte auf Kläranlagen" Korrespondenz Abwasser, Abfall 2016 (63), Nr.8, 704 713
- [3] Müller-Scharper, J.; Hermanussen, O.: Neue Erkenntnisse für Wärmekonzepte, DWA Energietage 2013, Garching

Anschrift des Verfassers / der Verfasserin:

Dr.-Ing. Ralf Mitsdoerffer GFM Beratende Ingenieure GmbH Akademiestraße 7 80799 München

E-Mail: mits@gfm.com