

Niedertemperatur-Abwärme der Molkerei NÖM

Andreas Hammer⁽¹⁾, Franz Wolf⁽¹⁾, Thomas Kienberger⁽¹⁾, Gerhard Bartak⁽²⁾,
Edith Haslinger⁽³⁾

⁽¹⁾Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben, +43 3842 402-5406, andreas.hammer@unileoben.ac.at, thomas.kienberger@unileoben.ac.at, evt.unileoben.ac.at; ⁽²⁾NÖM AG, Vöslauer Straße 109, 2500 Baden, gerhard.bartak@noem.at, www.noem.at; ⁽³⁾AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Integrated Energy Systems, Giefinggasse 4, 1210 Wien, edith.haslinger@ait.ac.at, www.ait.ac.at

Kurzfassung: Diese Arbeit wird im Rahmen des Projekts SANBA (Smart Anergy Quater Baden) durchgeführt. Ziel des Projektes ist es, für eine zukünftige Nutzung des ehemaligen Kasernen-Standortes der „Martinek-Kaserne“ in Baden bei Wien ein Heiz- und Kühlsystem zu entwickeln, das auf sogenannten Anergie- bzw. Niedertemperaturnetzen (< 30 °C) beruht.

Inhalt der gegenständlichen wissenschaftlichen Arbeit ist es, Ergebnisse aus der Erhebung von Abwärme- und Effizienzpotentialen des Molkereibetriebes der NÖM, welche in weiterer Folge zur Versorgung des Anergienetzes eingesetzt werden können, darzustellen.

Aus Prozessen wie Druckluftherzeugung, Kälteherzeugung, Dampferzeugung sowie dem Abwasser wurden Möglichkeiten der Abwärmenutzung identifiziert und bezüglich deren energetischen Potentialen und zeitlichen Abwärmeprofilen untersucht.

Erste Ergebnisse zeigen im betrachteten Niedertemperaturbereich bei Temperaturen von 20 bis 35 °C ein durchaus beachtliches Potential von bisher ungenutzter Abwärme. Dieses kommt zum überwiegenden Teil aus großen stromverbrauchenden Anlagensystemen (Druckluft, Kälteherzeugung), dem Abwasser der Reinigung und aus der nicht vorhandenen Abgaskondensation bei der Prozessdampferzeugung.

Die Berechnungen zeigen, dass insgesamt ein Potential von über 17 %, der in Form von Strom und Erdgas eingesetzten Endenergie als Niedertemperaturabwärme ausgekoppelt und weiter verwendet werden kann. Diese vorhandene Abwärme-Energie überschreitet dabei die für das Projekt SANBA erforderliche Wärme um ein Vielfaches. Die im Vorfeld des Projektes angedachte Nutzung der Abwärme des Abwassers wurde aufgrund der Gefahr des vermehrten Biofouling (organische Belagsbildung von Rohrleitungen) bei sinkenden Abwassertemperaturen verworfen. Stattdessen soll jetzt die Abwärme aus der Kältebereitstellung für das Kühllager ausgekoppelt und als Wärmelieferant an das Anergienetzes herangezogen werden.

Der Ausblick für weitere Arbeiten ist die Untersuchung innerbetrieblicher Verwendung nicht benötigter Abwärme mittels Wärmepumpen, eventuell auch mit Einbeziehung von Speichern.

Keywords: Abwärme, Niedertemperaturwärme, Anergienetz, Exergie,

1 Einleitung

1.1 Beschreibung des Projektes SANBA

Die ehemalige „Martinek-Kaserne“ südlich von Baden und wird seit dem Jahr 2014 nicht mehr vom Österreichischen Bundesheer genutzt und steht seit damals leer. Bis jetzt konnte keine zukünftige Nutzung der denkmalgeschützten Gebäude aus den 1930er Jahren erreicht werden.

Das Projekt SANBA hat sich zum Ziel gesetzt, für eine zukünftige Nutzung dieses Areals ein so genanntes Anergie- oder Niedertemperatur-Heiz- und Kühlsystem ($< 30\text{ °C}$) zu entwickeln und im Zuge dieser Arbeit offene Forschungsfragen zu beantworten. Dies ist vor allem die Kombination des Anergienetzes mit einem Erdwärme-Sonden-Feld. Dieses soll den saisonalen Ausgleich von Last und den anfallenden Abwärmern bewerkstelligen (Abbildung 1).

Neben der Untersuchung zur Einbindung eines Erdwärme-Sonden-Feldes, sowie die Entwicklung von Sanierungs- und Umrüstungskonzepten für die denkmalgeschützten Kasernengebäude, ist einer der zentralen Punkte des Projekts SANBA die Nutzung der industriellen Niedertemperatur-Abwärme aus den Prozessen der benachbarten Molkerei NÖM.

Das Konzept des Anergienetzes umfasst die Abwärmenutzung aus der benachbarten Molkerei, die lokal verfügbaren erneuerbaren Energiequellen, Energiespeicheraspekte, unterschiedliche Gebäudestandards mit diversen Nutzungsmöglichkeiten und damit unterschiedlichen Angebotstemperaturen und Nachfrageeigenschaften, sowie der Möglichkeit der moderaten Kühlung über das sogenannte „Free Cooling“.

Mit neuartigen Simulationswerkzeugen soll der komplexe Energieverbund aus diesen verschiedenen Wärmequellen, dem Erdsondenfeld und den denkmalgeschützten und potentiellen neuen Gebäuden bei unterschiedlichen Temperaturniveaus des Anergienetzes untersucht werden.

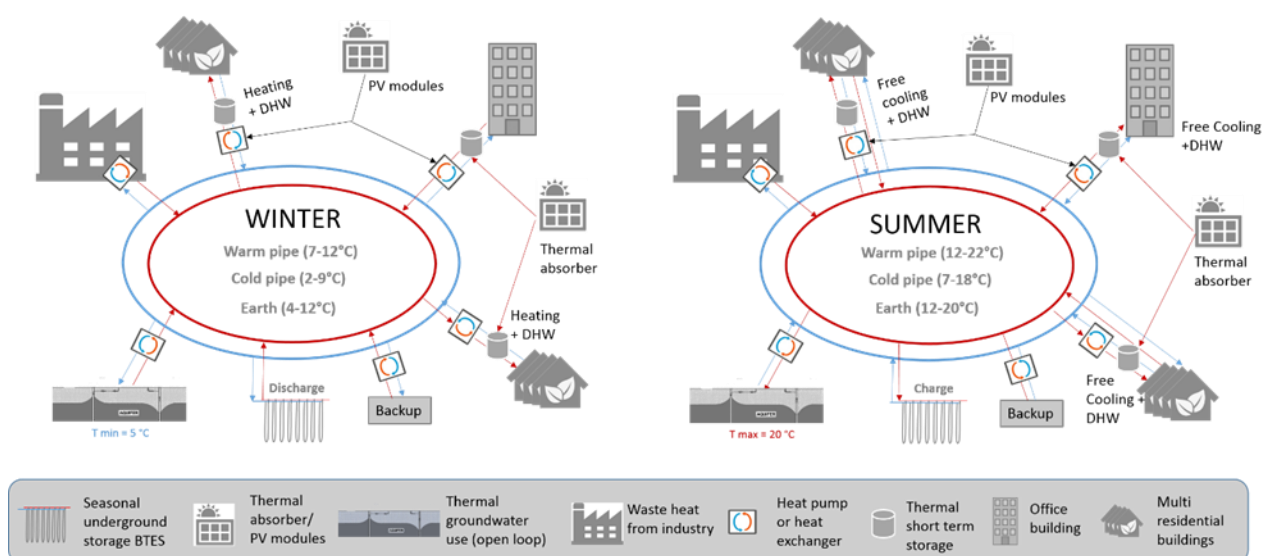


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Anergie-Heiz- und Kühlnetzes [1]

1.2 Ziel und Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist die Analyse des Energiesystems des Molkereibetriebes der NÖM AG mit Sitz in Baden bei Wien, um Abwärmepotentiale zu ermitteln und daraus folgend zeitlich aufgelöste Abwärmeprofile zu erstellen. Diese Abwärmepotentiale sollen als Hauptversorgung des Anergienetzes dienen, wobei die ermittelten Abwärmeprofile als eine der wichtigsten Eingangsgrößen bei der Simulation des gesamten Energieverbundes (NÖM – Sondenfeld – Martinek-Areal) dienen.

Die Aufgabenstellung umfasst dabei hauptsächlich die Analyse des Molkereibetriebes, wobei hier versucht wird, auf bereits bestehende Daten des Betriebes zurückzugreifen. Im Falle von nicht vorhandenen Daten sind Messungen durchzuführen. Um die Daten weiter verwenden zu können, sind diese aufzubereiten und auf Plausibilität zu prüfen.

Des Weiteren ist durch eine zeitlich aufgelöste exergetische Bewertung der Abwärmern die Qualität zu beurteilen und eine gegebenenfalls innerbetriebliche kaskadische Nutzung über Wärmepumpen zu prüfen, um die Primärenergieeffizienz der Molkerei zu erhöhen.

2 Methodik und Vorgehensweise

Die Analyse des Energiesystems des Molkereibetriebes der NÖM wurde zusammen mit den verantwortlichen Mitarbeitern des Betriebes durchgeführt. Aufbauend auf Begehungen und Gesprächen wurden mit vorhandenen Unterlagen und Schemata die für die Nutzung relevanten Abwärmeströme identifiziert (Abbildung 2).

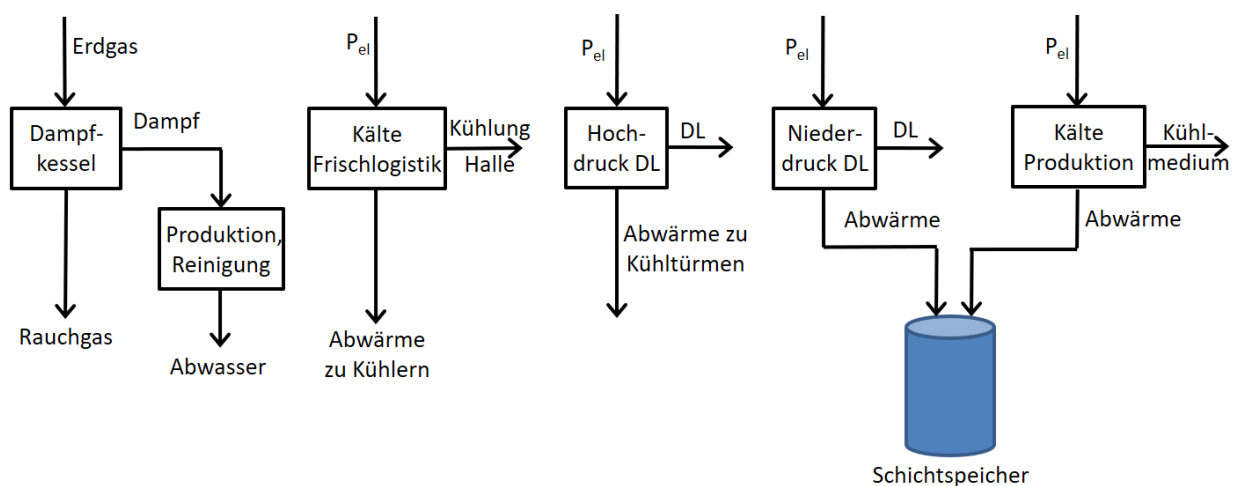


Abbildung 2: Einfache Übersicht der verfügbaren Abwärmern in der NÖM

In den nachfolgenden Punkten wird nun kurz auf die einzelnen Abwärmeströme eingegangen, deren Datenlagen beschrieben und theoretische Überlegungen zu deren exergetischer Bewertung angestellt.

2.1 Beschreibung der relevanten Abwärmeströme

Abwasser

Die im Betrieb aus der Reinigung der Anlagen und Leitungen (sog. CIP – Cleaning in place) anfallenden vier Abwasserströme des Produktionsbetriebes werden in drei Puffertanks gesammelt, anschließend über einen Siebrechen geführt und in weiterer Folge über lange Kanäle in die kommunalen Abwasserreinigungsanlagen von Bad Vöslau und Baden geleitet. Hier sind innerbetrieblich Aufzeichnungen der Durchflussmengen, Temperaturen und des pH-Wertes vorhanden.

Kälte Frischlogistik

Zur Kühlung der Frischlogistik (sog. FRILO) auf etwa 3 bis 4 °C werden mehrere Kältekompressoren eingesetzt, die einen Kaltsolekreis mit einem Glykol-Wasser-Gemisch versorgen. Die Abwärme der Kältemaschinen wird über eine gemeinsame „Warmsole“-Sammelleitung zu Tischkühlern am Dach geleitet und an die Umgebung abgegeben.

Es stehen zeitaufgelöste Daten bezüglich der aufgenommenen elektrischen Leistung der Kältemaschinen, sowie Temperaturdaten von Vorlauf und Rücklauf des Warm- und Kaltsolekreislaufs zur Verfügung. Zu den Volumenströmen gibt es keine internen Aufzeichnungen, sie müssen über selbst durchgeführte Messungen ermittelt werden.

Hochdruck-Druckluft

Die Hochdruck-Druckluft auf einem Druckniveau von 30 bar wird für das Aufblasen von PET-Flaschenrohlingen benötigt. Dafür gibt es insgesamt drei Kolbenkompressoren mit jeweils einem Vorverdichter. Die von den Kompressoren abgeführte Abwärme wird über separate Wasser-Glykol-Leitungen an Tischkühler bzw. Kühltürme am Dach geleitet. Von den Hochdruck-Druckluftanlagen stehen zeitaufgelöste Daten der Leistungsaufnahme und die Temperaturen der Kühlkreisläufe zur Verfügung. Daten der Volumenströme sind nicht vorhanden und müssen durch selbst durchgeführte Messungen ermittelt werden.

Schichtspeicher

Es sind zwei Wärmespeichersysteme in Form von Schichtspeichern vorhanden.

Der 50 °C - Speicher wird über Abwärme der Reinigungsflüssigkeiten (CIP) in der Anlage geladen und für Warmwasserbereitung, Lüftung, Büroheizung und Vorwärmung der Reinigungsflüssigkeiten eingesetzt. Aufgrund ganzjähriger Auslastung dieses Speichers ist eine weitere Auskopplung von Abwärme nicht möglich.

Der 75 °C - Speicher wird mit Abwärmern der Niederdruck-Druckluftanlagen und Kältemaschinen der Produktion gespeist. Die gespeicherte Wärme wird hauptsächlich für die Warmwasserbereitung und Heizung der Bürogebäude herangezogen und besitzt ungenutztes Potenzial zur Auskopplung.

Dampfkesselanlagen

Bei der Prozessdampferzeugung für die Produktion und Reinigung kommt ein redundantes System mit zwei Kesselanlagen zum Einsatz, welches Dampf mit einer Frischdampf Temperatur von bis zu 190 °C und einem Druck von 11,5 bar erzeugt, vor der Verteilung des Dampfes erfolgt eine Drosselung auf 8,5 bar. Es wird ein Großteil des eingesetzten Dampfes in Form von Kondensat aus der Produktion in die Kesselanlage zurückgeführt. Die Restmenge wird mit

Frischwasser ergänzt und über einen Abgaswärmetauscher von ca. 12 °C auf 85 °C vorgewärmt. Es stehen zeitaufgelöste Daten von zugeführter Gasmenge, der erzeugten Dampfmenge und der Abgastemperatur zur Verfügung.

2.2 Mess- und Berechnungsmethoden

Durchfluss- und Temperaturmessung

Für die Durchflussmessung wurde ein Ultraschall-Messverfahren eingesetzt, da durch diese flexible Messmethode nicht in den Prozess eingegriffen werden muss und die Messsensoren rasch und einfach anzubringen sind. Es wurden Messaufnehmer der Type SE1790 und Messumformer vom Typ Minisonic 600 der Firma Ultraflux verwendet.

Die Temperaturmessung erfolgte über kupferummantelte Oberflächentemperaturfühler auf Basis von Widerstandsthermometern.

Für die digitale Umformung der analogen Signale, Anzeige und Speicherung wurden Datenlogger der Type DT80M der Firma Thermofischer verwendet.

Grundlagen und Berechnungen von Energie und Exergie

Die Exergie beschreibt die technische Arbeitsfähigkeit eines Energiesystems – kurz gesagt, ist die Exergie ein Maß für die Energiequalität. Energie kann demzufolge in eine arbeitsfähige Komponente, der Exergie E und in eine nicht arbeitsfähige Komponente, der Anergie A , unterteilt werden [4].

$$E_n = E + A \quad (1)$$

Exergieanalysen dienen der Bewertung der Energiequalität, einerseits der Energieströme in den Prozessen und andererseits der Abwärmen, mit dem Ziel des Aufzeigens von nutzbaren Energiepotentialen, Einbindung dieser in innerbetriebliche Prozesse und folglich der Erhöhung der Primärenergieeffizienz. Die Darstellung erfolgt mittels Grassmann-Diagrammen (Exergie-Flussbilder) und grafischer Darstellung der Energie- und Exergieflüsse [6] entlang des Produktionsprozesses. Für exergetisch variable Energieströme werden zeitaufgelöste Darstellungen verwendet.

Die Exergie der Wärme kann generell durch Multiplikation des Wärmestroms \dot{Q} mit dem Carnot-Faktor berechnet werden:

$$\dot{E} = \dot{Q} * \left(1 - \frac{T_R}{T}\right) = \dot{Q} * \eta_c \quad (2)$$

Entscheidend ist hier Referenztemperatur T_R . Oftmals wird als Referenztemperatur die Umgebungstemperatur eingesetzt, in diesem Fall ist dies jedoch die Temperatur des Anergienetzes. Die Wärmestrom \dot{Q} einer massebezogenen Quelle berechnet sich wie folgt:

$$\dot{Q} = \dot{m} * c_p * (T_H - T_C) \quad (3)$$

Wobei es sich bei dem Faktor c_p um die Wärmekapazität des Stoffes handelt.

Der Exergiestrom \dot{E}_{DL} der Druckluft berechnet sich nach Bader und Kissock [5]:

$$\dot{E}_{DL} = \dot{m} * c_p * (T_2 - T_1) + \dot{m} * T_{atm} * \left(R * \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) - c_p * \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)\right) \quad (4)$$

Die Exergiestrom der Druckluft \dot{E}_{DL} beschreibt die technisch nutzbare Leistung der Druckluft am Verdichterausgang. Indizes (1) beschreiben den Zustand vor dem Verdichter (Ansaugseite), Indizes (2) beschreiben den Zustand am Verdichterausgang.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Erhebungen und Berechnungen zeigen, dass in allen betrachteten Abwärmeströmen ein beachtliches energetischen Potential an Niedertemperaturwärme vorhanden ist. Im Folgenden werden die energetischen und exergetischen Potentiale dargestellt.

3.1 Einzelergebnisse Energie und Exergie

Abwasser

Das Abwasser verlässt die Produktion mit Temperaturen im 27 - 34 °C. Trotz der kurzfristig starken Temperaturschwankungen im Reinigungsprozess kann aufgrund der großen Anzahl von täglich bis zu 200 CIP-Reinigungsdurchläufen von einem konstanten Abwärmeprofil gesprochen werden. Wird das Abwasser auf 25 °C abgekühlt können durchschnittlich etwa 4,4 % an Wärmeleistung, bezogen auf die Summe der am Standort eingesetzten Energie durch Strom und Gas, rückgewonnen werden. Bei einer Abkühlung auf 20 °C sind dies sogar in etwa 6,6 %.

Der exergetische Anteil beläuft sich je nach saisonal unterschiedlich angenommenen Temperaturen des Energienetzes (Sommer 18 °C, Winter 10 °C) auf etwa 4 - 7 %, was auch dem Energiequalitätsgrad [7] bzw. der Arbeitsfähigkeit entspricht.

Kälte Frischlogistik

Die verfügbare Leistung der Warmsole zu den Tischkühlern am Dach ergibt sich aus den gemessenen Volumenströmen und den Temperaturen von Vorlauf und Rücklauf. Letztere bewegen sich in Abhängigkeit der Außentemperatur zwischen 23 und 40 °C, wobei die Spreizung mit etwa max. 3 K sehr gering ist.

Aus den berechneten Daten zeigt sich ein sehr unregelmäßiges, sich sprunghaft änderndes Abwärmeprofil. Die Abwärmeleistung variiert vorwiegend zwischen zwei Leistungsniveaus, welche sich mit einem Faktor von etwa 2,5 unterscheiden. Der Grund dafür ist, dass in etwa 80 % der Zeit die Differenzleistung über eine eigene Warmsoleleitung zum Abtauen der Luftkühler im Kühlraum verwendet wird. Die durchschnittliche Leistung, welche den Tischkühlern zugeführt wird, betrug im betrachteten Zeitraum etwa 5,7 % der Summe am Standort eingesetzten Energie durch Strom und Gas.

Hochdruck-Druckluft

Von den drei Hochdruckanlagen laufen zwei abwechselnd bzw. in Ergänzung, die dritte Anlage fungiert als Ausfallsreserve. An Wochenenden wird keine Hochdruck-Druckluft benötigt. Grundsätzlich sind die Lastprofile sehr unregelmäßig, sodass sich über den bisherigen kurzen Messzeitraum kein verlässliches Muster erkennen lässt. An warmen Tagen können Vorlauftemperaturen bis zu 50 °C erreicht werden. Die auskoppelbare Abwärme beträgt in Summe etwas über 1,8 % der Summe am Standort eingesetzten Energie durch Strom und Gas.

Schichtspeicher

Auf Basis der vorhandenen Daten wurde ein Lastprofil für die vom Schichtspeicher versorgten Abnehmer für das Jahr 2017 erstellt.

Die Erstellung eines Lastprofils für die mögliche Abwärmeauskopplung erfolge über den Umweg der Berechnung von Tagesmitteltemperaturen und Heizgradtagen. Die Heizgradtage HGT sind die, über alle Heiztage eines Jahres gebildete Summe der täglich ermittelten Differenz zwischen Raum- und mittlerer Außentemperatur [2,3].

$$HGT = \sum_j^z (T_{h.G.} - T_{j,m.A.}) \text{ in } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

Die Außentemperaturen wurden aus der Datenbank des PVGIS [8] bezogen.

Die aus dem Schichtenspeicher zur Verfügung stehende jährliche Energiemenge beträgt in Summe etwas über 1,1 % der Summe am Standort eingesetzten Energie durch Strom und Gas. Gemäß Lastprofil in Abbildung 2 steht die Energie vorwiegend im Sommer zur Verfügung. Die zu erkennende Abflachung bei 100 % ist auf die begrenzte Kapazität eines bestehenden Wärmetauschers zurückzuführen. Das Temperaturniveau bewegt sich dabei im Bereich von 70 – 75 °C.

Bezogen auf 75 °C im Speicher und 10 °C des Anergienetzes entspricht dies einem Exergieanteil von 18 %.

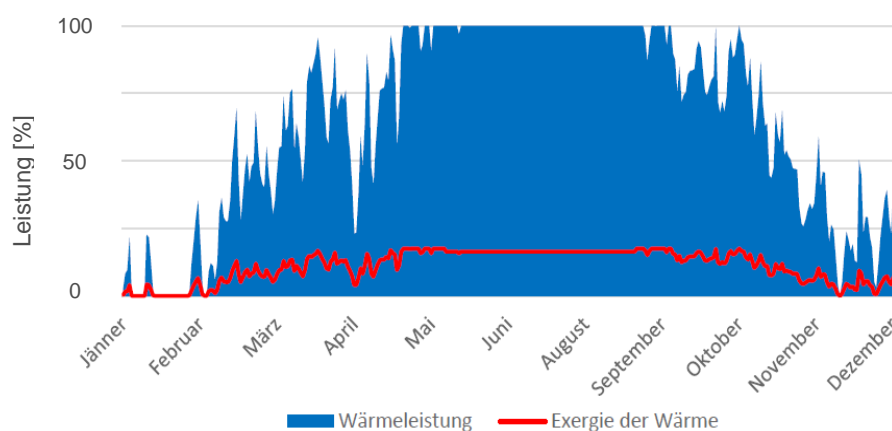


Abbildung 2: Abwärmepotentialprofil Energie und Exergie der überschüssigen Wärme aus dem Schichtspeicher

Dampfkessel

Die Abgastemperaturen beim Dampfkessel bewegen sich im Bereich von 65 bis 70 °C. Bei einem Taupunkt von etwa 58 °C, einer Luftzahl von 1,05 kann bei Annahme einer Abgasabkühlung auf 30 °C von einem Grad der Kondensation von etwa 80 % ausgegangen werden [9]. Über eine Verbrennungsrechnung und den oben durchgeführten Annahmen wurde ein energetisches Potential der Kondensation von etwa 4,4 % der Summe am Standort eingesetzten Energie durch Strom und Gas errechnet.

Diese noch nicht genutzte Abwärme könnte einerseits in ein Anergienetz eingespeist werden, noch besser - vor allem im Sinne der Primärenergieeffizienz - wäre der Einbau eines

Luftvorwärmers für die Gasbrenner. Dadurch würde der Gaseinsatz bei gleicher Dampfleistung reduziert werden. Wegen des sehr beengten Platzangebotes ist jedoch die Installation eines Luftvorwärmers kaum möglich. Der Exergieanteil beläuft sich dabei je nach saisonal unterschiedlich angenommenen Temperaturen des Anergienetzes (Sommer 18 °C, Winter 10 °C) zwischen 13 und 17 %.

Abbildung 3 zeigt den Energie- bzw. Exergieverlauf der Dampferzeugung, ausgehend vom Gaseinsatz, über die Dampferzeugung, die Drosselung bis hin zum Abwasser, welches den Betrieb in Richtung Kläranlage verlässt. Dabei ist zu erkennen, dass bei der Erzeugung des Dampfes die meiste Exergie verloren geht.

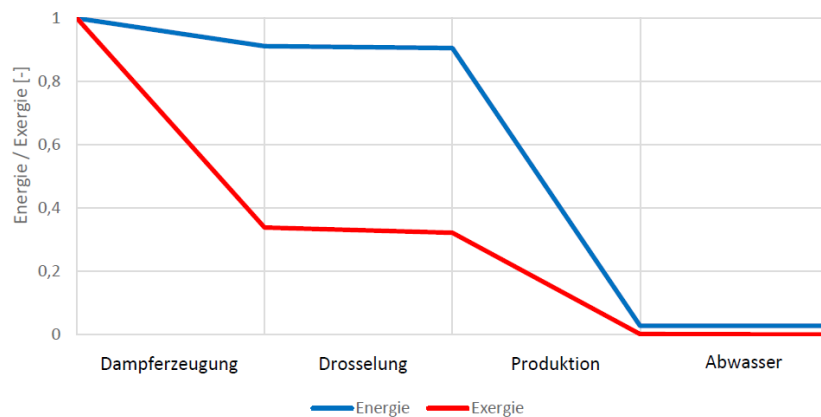


Abbildung 3: Energie- bzw. Exergieverlauf von Dampferzeugung bis Abwasser

3.1.1 Zusammenfassung der Abwärmepotentiale

In Tabelle 1 sind die oben beschriebenen Abwärmequellen nochmals übersichtlich dargestellt, wobei als Vergleich auch die eingesetzte Energie angeführt ist.

Tabelle 1: Zusammenfassung aller nutzbaren Abwärmequelle mit Energiepotential, durchschnittlicher Leistung und Temperaturniveau

Abwärmequelle	Energieanteil bezogen auf Endenergieeinsatz am Standort [%]	Exergieanteil am jeweiligen Abwärmestrom [%]	Temperaturniveau [°C]
Abwasser (Ref. 25 °C)	4,4	4 - 7	27 - 34
Frischlogistik	5,7	2 - 10	23 - 40
Hochdruck - Druckluft	1,8	5 - 12	25 - 50
Schichtspeicher 75 °C	1,1	15 - 18	70 - 75
Abgas Dampfkessel	4,4	13 - 17	65 - 70
Summe Potential Abwärmern	17,4		
Summe Energieeinsatz durch Gas und Strom	100		

4 Zusammenfassung und Fazit

Erste Ergebnisse zeigen im betrachteten Niedertemperaturbereich (Temperaturen von 20 bis 35 °C) ein durchaus beachtliches Potential an Abwärme. Dieses stammt zum überwiegenden

Teil aus großen stromverbrauchenden Anlagensystemen wie z.B. den Aggregaten zur Lagerkühlung oder Produktkühlung sowie aus Druckluftanlagen. Ebenso ist im Abwasserstrom der Molkerei eine große Menge an Wärmeenergie vorhanden. Die Auskopplung von Wärme bei einem höheren Temperaturniveau bis zu 75 °C ist bei der Abgaskondensation am Dampfkessel und beim Wärmespeicher möglich, bei letzterem allerdings vorwiegend nur in der wärmeren Jahreszeit.

Erste Berechnungen zeigen, dass insgesamt ein Potential von über 17 % der in Form von Strom und Erdgas eingesetzten Endenergie als nutzbare Niedertemperaturabwärme verfügbar ist. Die in Summe vorhandene Abwärme überschreitet dabei die, für das Projekt SANBA erforderliche Wärme um ein Vielfaches. Ein Teil könnte z.B. in Verbindung mit einer Wärmepumpe innerbetrieblich als Ersatz für einen kleineren Heizkessel genutzt werden.

Die im Vorfeld des Projektes angedachte Nutzung der Abwärme des Abwassers wurde aufgrund der Gefahr des vermehrten Biofouling (organische Belagbildung in Rohrleitungen) aufgrund der bei einer Abwärmenutzung reduzierten Abwassertemperaturen verworfen. Stattdessen soll nun die Abwärme aus der Kältebereitstellung für das Kühllager der Frischlogistik ausgekoppelt und zur Versorgung des Anergienetzes verwendet werden.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des NEFI_Lab-Projektes durchgeführt. NEFI_Lab ist ein Teilprojekt von NEFI – New Energie for Industry, eine vom österreichischen Klima- und Energiefonds finanzierte Vorzeigeregion Österreichs.

Literatur

- [1] Haslinger et.al.: Low-temperature heating and cooling grids based on shallow geothermal methods for urban areas, European Geothermal Congress 2019, Den Haag
- [2] Energieberatung Salzburg: Heizgradtage. URL <https://e5-salzburg.at/downloads/downloads-wissen-service/hf6/infoblatt-heizgradtage-2013.pdf>
- [3] Verein Deutscher Ingenieure: VDI3807, Blatt 1, Verbrauchskennwerte für Gebäude – Grundlagen, Düsseldorf, 2013
- [4] W. Fratzscher, V. Brodjanskij, K. Michalek, Exergie: Theorie und Anwendung, Springer Verlag, 2013.
- [5] W.T. Bader, J.K. Kissock, Exergy analysis of industrial air compression, Proceedings from the 22nd National Industrial Energy Conference, Houston, TX, April 5-6, 2000
- [6] L. Kriechbaum, D. Heinrich, A. Hammer, T. Kienberger, Werkzeug zur Ermittlung der Exergieeffizienz von Fernwärmesystemen, 10. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU-Wien IEWT, 2017
- [7] Bosnjakovic,F, Knoche K.F.: Technische Thermodynamik, Teil II, Steinkopf Darmstadt, 1997
- [8] European Commission: Photovoltaic Geographical Information System : PVGIS. URL https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP; zuletzt geprüft am 20.09.2019
- [9] Energielexikon: Brennwertkessel, <https://www.energie-lexikon.info/brennwertkessel.html>, zuletzt geprüft am 21.01.2020