

Grundsatzfragen der Abwärmenutzung



Was Sie bei der Abwärmenutzung in der Industrie beachten sollten!

Matthias Philipp, Gregor Schumm, Florian Schlosser, Ron-Hendrik Peesel, Uwe Holzhammer

In der Diskussion zum Thema Energieeffizienz wird regelmäßig über Abwärmenutzungstechnologien (AbWT) wie Sorptionskältemaschinen, Organic-Rankine-Cycle-Prozesse (ORC) oder Wärmepumpen diskutiert. Diese sollen eine praktikable Nutzung von Abwärme ermöglichen. Im Sinne eines Plug & Play Systems erfolgt die Ankopplung an eine Abwärmequelle und eine andere Nutzenergieform wie Strom, Kälte oder Hochtemperaturwärme kann an geeigneter Stelle wieder in den Prozess integriert werden. Doch wie lassen sich Abwärmequellen und –senken identifizieren? Ist es möglich diese mithilfe von Wärmerückgewinnungssystem direkt zu verbinden oder ist eine AbWT einzusetzen?

Energieeffizienz nach dem Zwiebelschalenmodell

Das Zwiebelschalenmodell, welches im Bereich der Energieeffizienz etabliert ist, beschreibt die grundlegende Herangehensweise an die Thematik. Energieeffizienzmaßnahmen werden dabei vom Prozess aus entwickelt, um negative Rückkopplungseffekte, die in der Energieversorgung entstehen können zu vermeiden. Abbildung 1 veranschaulicht, dass mit sinkendem Prozessenergiebedarf auch die Größe der äußeren Schalen abnimmt. Deshalb gilt es bei der Anwendung von thermischer Energie so viel Wärme wie möglich zurückzugewinnen. Durch intelligente Verschaltung von Energieströmen lässt sich Wärme im System halten und muss nicht zusätzlich bereitgestellt oder weggekühlt werden.

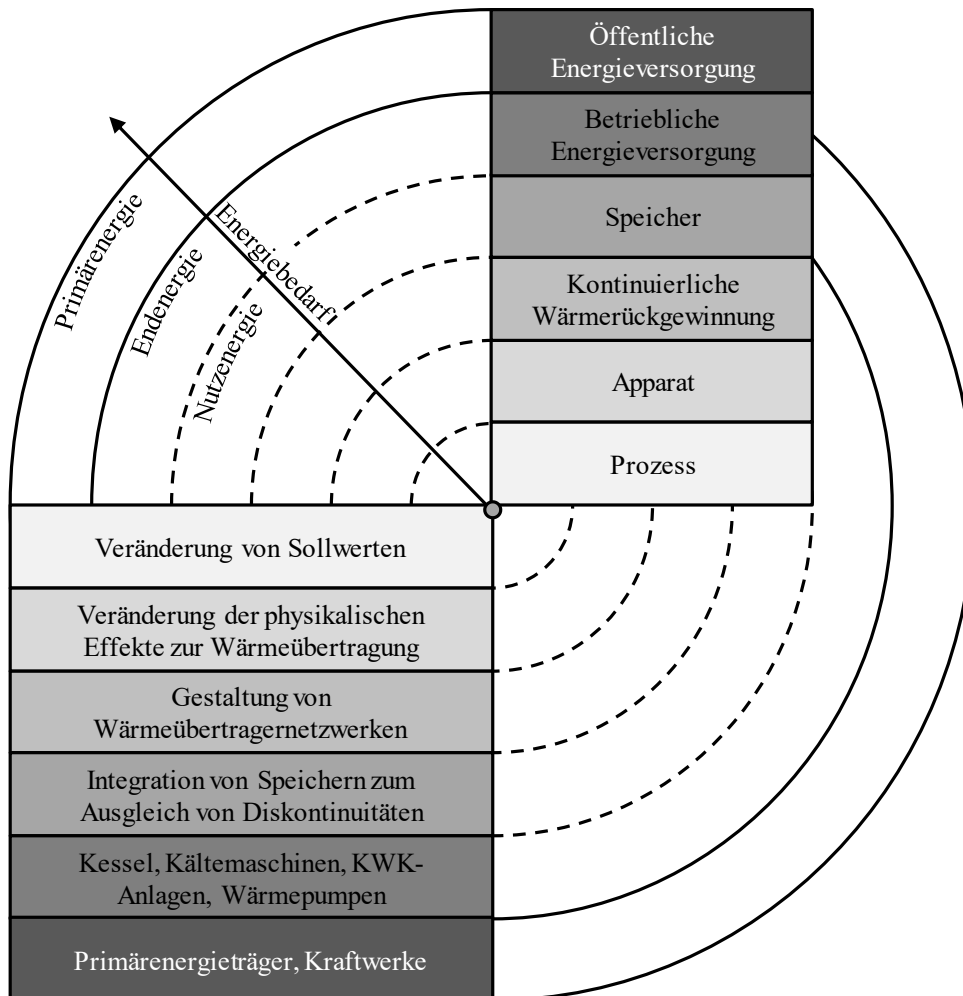


Abbildung 1: Zwiebelschalenmodell [1–3]

Ein anschauliches Beispiel ist die Pasteurisierung von Milch. Der Prozess erfordert die Erhitzung von Lagerungstemperaturen um 4 bis 8 °C auf 72 bis 75 °C für 15 bis 20 Sekunden [4]. Danach erfolgt eine Abkühlung für einen weiteren Zwischenlagerungsschritt. Das Aufheizen sowie das Abkühlen können theoretisch ausschließlich durch externe Energie aus fossilen Energieträgern erfolgen. Logischerweise kann der aus der Lagerung kalt in den Pasteur eintretende Milchstrom vom bereits erwärmten Produkt vorgewärmt und gleichzeitig der austretende Strom gekühlt werden. Dieser Ansatz ermöglicht Wärmerückgewinnungsraten von über 90 %. Das vorgestellte einfache Beispiel verdeutlicht den Nutzen von Wärmerückgewinnung. Weitaus schwieriger stellt sich die Bestimmung der Wärmerückgewinnungspotentiale bei einer großen Anzahl von Energieströmen dar. Es gibt grundsätzlich viele Möglichkeiten diese Wärmesenken und Wärmequellen miteinander zu verschalten. Fraglich ist mit welcher Verschaltung möglichst viel Wärme im System gehalten und wie verbleibende Abwärme sinnvoll integriert werden kann.

Pinch Methodik

Mit der Pinch-Analyse [1,5,6] existiert eine methodische Vorgehensweise, die Antworten auf diese Frage liefert. Sie ordnet graphisch sämtliche thermischen Ströme als Quellen- bzw. Senkenprofil in Form der Verbundkurven nach Leistung und Temperatur der Wärme. Mithilfe dieser können Wärmerückgewinnungssysteme, aber auch AbWT geplant und thermodynamisch korrekt eingebunden werden. In der Chemieindustrie wird sie seit den 1980er Jahren bereits erfolgreich angewendet. Beispielsweise konnte BASF am Standort Ludwigshafen eine installierte thermische Leistung von 490 MW einsparen [7]. In der Milchverarbeitenden Industrie gibt es Untersuchungen, die auf dieser Methode aufbauen [8–11] und ebenfalls sehr gute Energieeffizienzsteigerungen erzielen. Prinzipiell ist die Anwendung überall dort möglich, wo thermische Energie in Flüssigkeiten oder Gasen angewendet wird.

Diese Methode beinhaltet eine Reihe von Werkzeugen, die in Kombination miteinander anwendbar sind. Das in Abbildung 1 dargestellte Flussdiagramm zeigt das schrittweise Vorgehen für eine vollumfassende Analyse. Für das betrachtete Optimierungsproblem der Wärmeintegration werden im Folgenden zunächst nur die ersten beiden Schritte umfassend betrachtet. Im ersten Schritt erfolgt die Analyse des Prozessbedarfs durch eine tabellarisch aufbereitete Massen- und Energiebilanz. Diese ist die Grundlage für die weiteren Bearbeitungsschritte und letztendlich für die Ergebnisse. Dies erfordert ein hohes Maß an Sorgfalt.

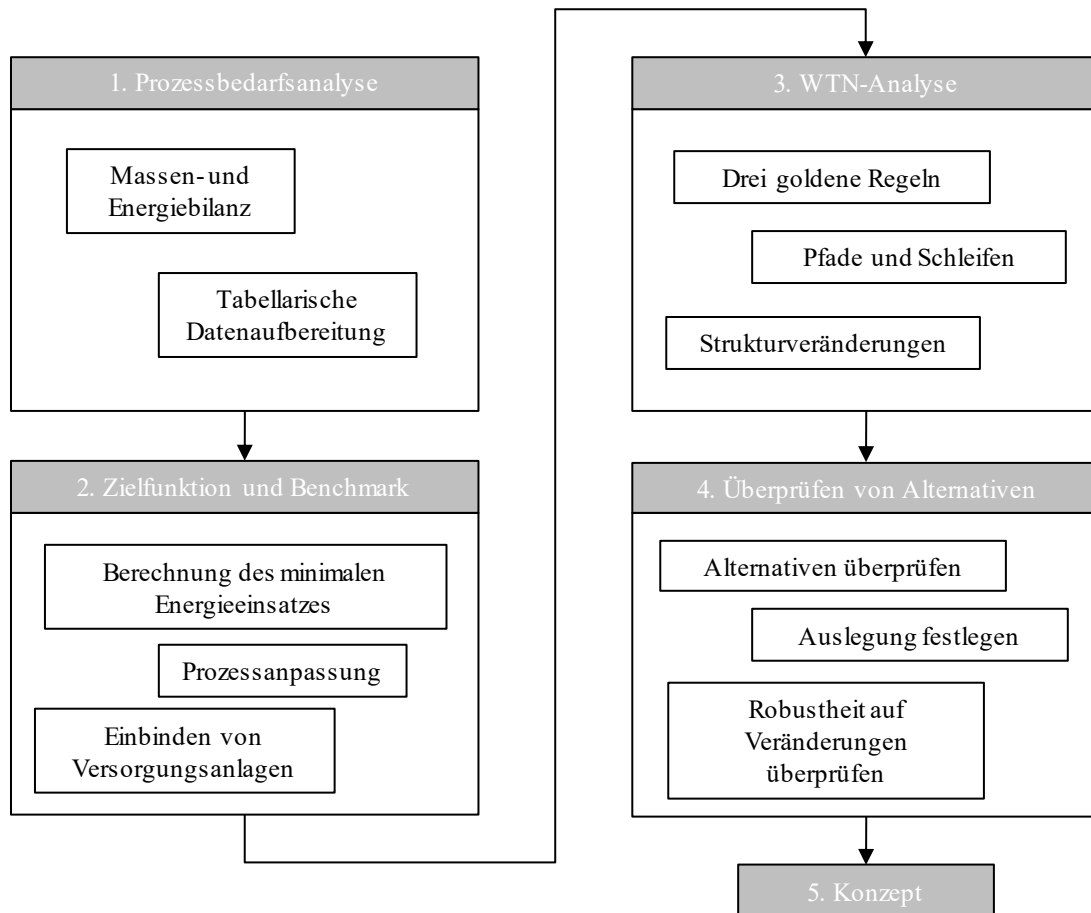


Abbildung 2: Vorgehensweise bei der Pinch-Analyse (Energy Research Center, University of Waikato, Neuseeland)

Nach der Prozessbedarfsanalyse erfolgt der zweite Schritt zur Berechnung der Zielfunktion nach 1) zur objektiven Bewertung der Energieeffizienz. Er stellt dar, welche Leistung thermodynamisch für Heizen und Kühlen notwendig ist und welche thermische Leistung maximal durch Wärmerückgewinnung im System gehalten werden kann. In den weiteren Schritten gilt es unter Berücksichtigung der Pinch-Regeln und dem zeitlichen Verhalten sowie der räumlichen Distanzen zwischen den Energieströmen ein robustes Konzept zu entwickeln.

Interpretation der Verbundkurven

Abbildung 3 zeigt die sogenannten Verbundkurven, die das thermodynamische Profil eines betrachteten Systems widerspiegeln. Dabei stellt die kalte Verbundkurve (blau) sämtliche aufzuheizende Prozessströme (Wärmesenken), die warme Verbundkurve (rot) abzukühlende Prozessströme (Wärmequellen), über die entsprechenden Leistungs- und Temperaturabschnitte, dar. Der Bereich, in dem sich die Verbundkurven überlagern, ist durch Wärmerückgewinnungssysteme zu erschließen. Daneben verbleiben die eingezeichneten Bedarfe für externes Kühlen und Heizen. Die im Englischen als „Pinch“-Temperatur (Deutsch: Einschnürung) bezeichnete Größe ist dabei die Wärme-Kälte-Grenze (WKG) des thermodynamischen Systems, welche das System in einen Bereich mit reinem Wärmebedarf und einen mit reinem

Kühlbedarf teilt. Diese WKG hat eine besondere Relevanz für die Wärmerückgewinnung und die Integration der Wärme- und Kälteversorgung.

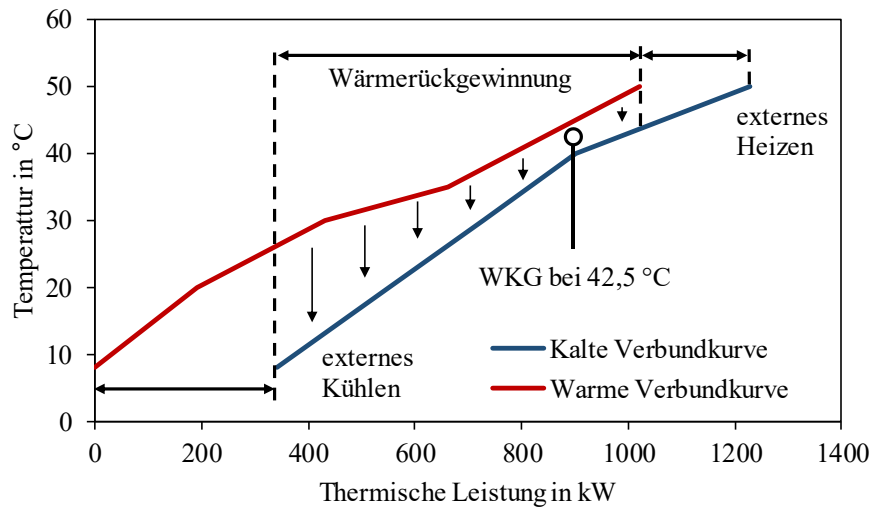


Abbildung 3: Beispiel einer Verbundkurve zur Bestimmung des minimalen Energiebedarfs

In der Gesamtverbundkurve, Abbildung 4, ist der Bereich der Wärmerückgewinnung herausgerechnet. Abbildung 4 stellt demnach den verbleibenden Bedarf für Heizen und Kühlen nach Erschließung der Wärmerückgewinnungspotenziale dar. Besonders interessant für die Ergebnisse sind die Temperaturen und thermischen Leistungen auf denen extern Wärme zu- und abgeführt werden muss. Die Wärmezufuhr erfolgt in diesem Beispiel auf einem Temperaturniveau von 55 °C. Typischerweise kommt dann ein Heißwassernetz (mit z. B. 70 °C Vorlauftemperatur) zum Einsatz. Bei der Kühlung lässt sich die thermische Leistung auf zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus abführen. Zum einen kann eine Wärmeleistung von ca. 205 kW mit einem gewünschten Temperaturniveau von 27,5 °C kosteneffizient über einen Kühlturm an die Umgebung abgeführt werden. Zum anderen ist die vom Prozess geforderte Temperatur von 5,5 °C der restlichen 40 % Kühlleistung so niedrig, dass diese z. B. über eine Kompressionskältemaschine bereitgestellt werden muss.

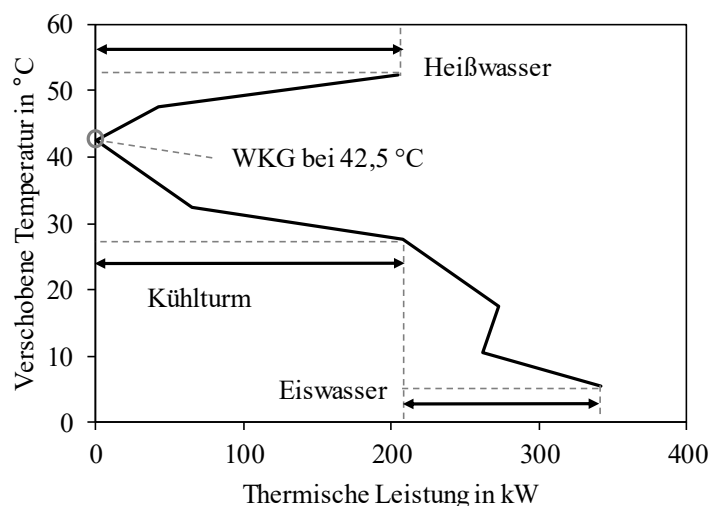


Abbildung 4: Die zum Beispiel der Abbildung 3 korrespondierende Gesamtverbundkurve

Die Gesamtverbundkurve ist für die Optimierung der Abwärmenutzung ein entscheidendes Diagramm. Mithilfe dieser Kurve lässt sich die AbWT bzw. die Bereitstellung von Wärme und Kälte auf entspre-

chendem Temperaturniveau unter Berücksichtigung des theoretischen Wärmerückgewinnungspotenzials thermodynamisch korrekt integrieren. In der Pinch-Analyse gibt es drei „goldene“ Regeln [1]. Diese besagen, dass unter der WKG nicht geheizt, darüber nicht gekühlt und Wärme nicht über die WKG transportiert werden darf. Daraus ergeben sich die in Abbildung 5 dargestellten thermodynamisch sinnvollen Integrationen.

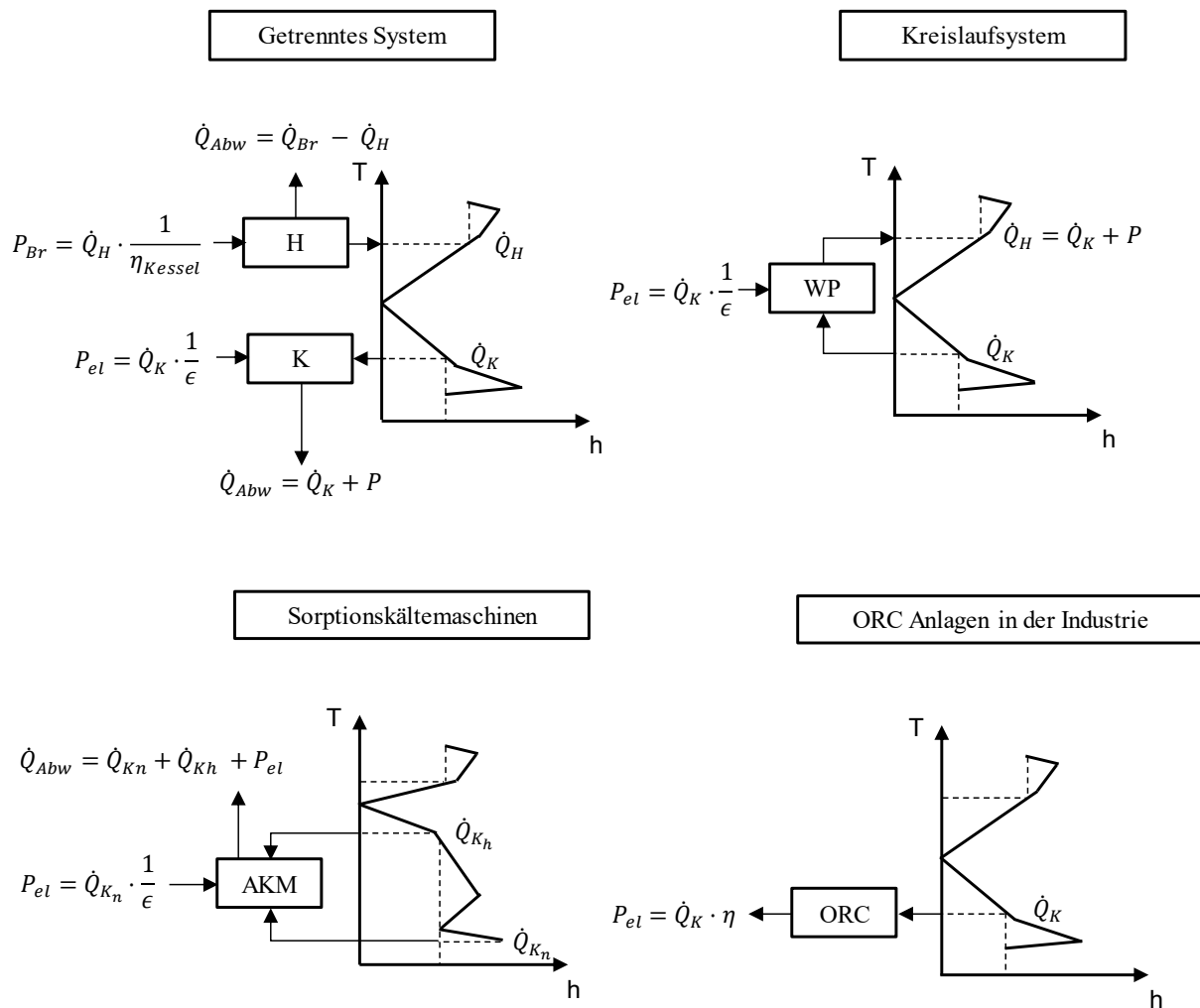


Abbildung 5: Gesamtverbundkurven und die richtige Integration der Versorgungsanlagen [3] (Indizes: Br: Brennstoff, el: Elektrisch, K: Kühlen, H: Heizen, h: hoch, n: niedrig, Abw: Abwärme)

Getrennte Energiebereitstellung

Die konventionelle Energieversorgung erfolgt oftmals mit einem getrennten System. Die Wärmebereitstellung erfolgt beispielsweise über einen Kessel. Entkoppelt davon wird die Wärmabfuhr über eine Kältemaschine, typischerweise eine Kompressionskältemaschine, realisiert. Die beiden Systeme Wärmezuge- und Wärmefuhr sind somit voneinander regelungstechnisch getrennt und einfach zu handhaben. Jedoch lassen sich Abwärmeverluste \dot{Q}_{Abw} aus den Maschinen zur Wärme- und Kältebereitstellung (Rückkühlung der Kältemaschine und Restwärme im Abgas des Kessels), wie Abbildung 5 zeigt, nicht vermeiden.

Gekoppeltes System

Das Kreislaufsystem verbindet die kalte und heiße Seite des thermodynamischen Systems über eine Wärmepumpe (Wärme-Kälte-Kopplung). Dort wird die beim Kühlen freiwerdende Energie durch elektrischen Strom soweit veredelt, dass sie dem Prozess wieder auf einem höheren Temperaturniveau zugeführt werden kann. Dies ist sehr effizient, da im idealen Auslegungsfall keine Abwärme an die

Umgebung abzuführen ist. Das System der getrennten Erzeugung wird dadurch geschlossen. 12) zeigen die Einsatzmöglichkeiten von Ammoniak Wärmepumpen nach Branchen differenziert. Dabei wird eine hohe Effizienz auch bei großen Temperaturspreizungen erreicht.

Kälte aus Abwärme

Sorptionskältemaschinen sind mit Abwärme betriebene Kältemaschinen. Die Abwärme ist auf einem hohen Temperaturniveau (Antriebswärme-Entzug) aufzunehmen, um Kälte auf einem niedrigen Temperaturniveau bereitzustellen (Kühlbedarf-Wärmeentzug). Das bedeutet, dass Sorptionskältemaschinen Wärme auf zwei Temperaturniveaus dem Prozess entziehen. Die Rückkühlung \dot{Q}_{Abw} erfolgt in der Regel an die Umgebung. Laut Herstellerangaben kann nur eine hohe Effizienz bei Antriebstemperaturen oberhalb von 80 °C erzielt werden [13], was wiederum eine hohe WKG voraussetzt.

Strom aus Abwärme

ORC Anlagen entnehmen dem System Wärme zur Stromgenerierung. Sie sind damit, wie Kühlanlagen, unter der WKG einzubinden. Die vom ORC Prozess geforderte Abwärme sollte Temperaturen von 80 bis 135 °C aufweisen [14]. Entsprechend hohe WKGs sind daher Grundvoraussetzung für eine effiziente Nachverstromung.

Industriebeispiele

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welche Technologie für welchen Anwendungsfall geeignet ist? Jeder Betrieb weist ein eigenes thermodynamisches Energieprofil in Form einer Gesamtverbundkurve auf, die sich innerhalb einer Branche ähneln können. Mithilfe der GVK besteht nun, wie beschrieben, die Möglichkeit den Einsatz von AbWT fundiert zu bewerten. Im Folgenden sind Profile für die Milchindustrie (A), Fleischverarbeitung (B), Papierindustrie (C) und die Pflanzenölherstellung (D) auf Basis von bereits untersuchten Standortdaten dargestellt.

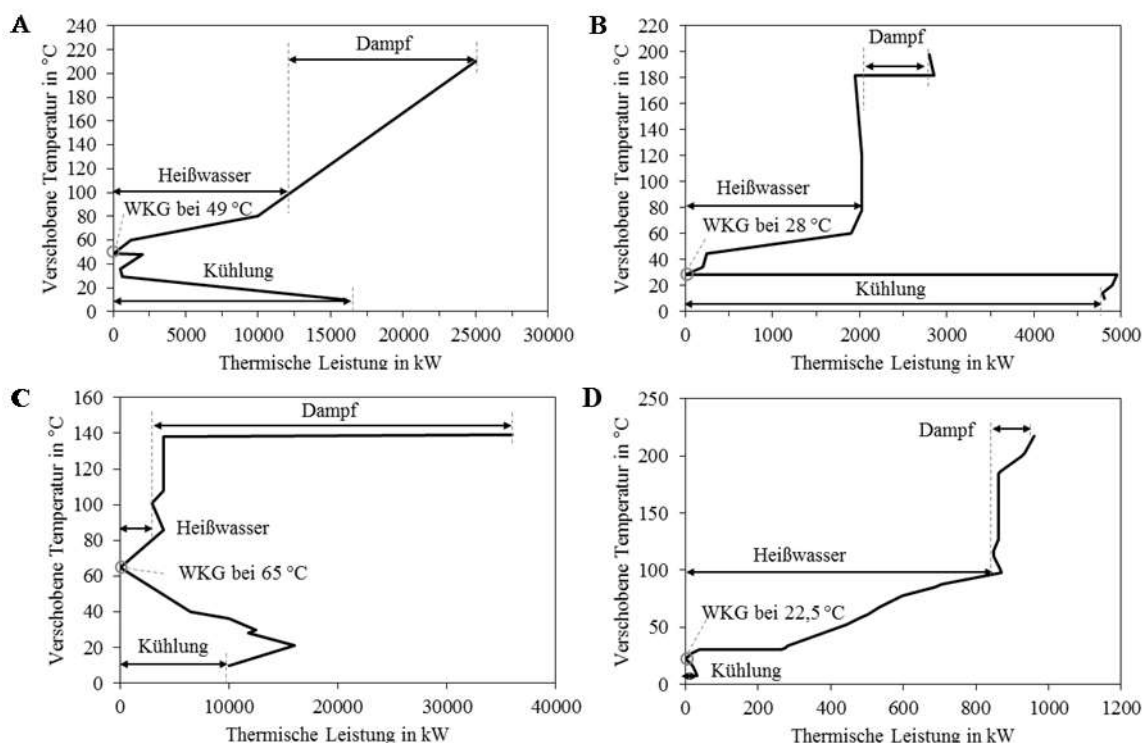


Abbildung 6: Gesamtverbundkurve einer **A** Milchtrocknung [15], **B** Fleischverarbeitung (Fritzson und Berntsson 2006), **C** Papierproduktion [16] sowie **D** Pflanzenölherstellung (17)

Standorte (A-C) bieten sich zur Integration von Wärmepumpen an. Insbesondere bei der Fleischverarbeitung (B) ist es, aufgrund des sehr flachen Profils, möglich eine große Leistung über einen kleinen

Temperaturhub effizient bereitzustellen. Im milchtrocknenden Betrieb (A) sind aufgrund des hohen Temperaturlifts zweistufige Applikation von Ammoniakkompressionskältemaschinen denkbar.

Bei der Pflanzenölherstellung (D) kann die Kühlwärme sehr gut im Prozess gehalten werden, so dass kaum externer Kühlbedarf besteht. Die Wärmekältengrenze liegt bei 22,5 °C. Abwärmenutzung ist trotz Prozesstemperaturen über 200 °C in der Produktion von Pflanzenöl aus thermodynamischen Gesichtspunkten nicht sinnvoll realisierbar. Für ein solches Profil bieten sich regenerative Niedertemperaturwärmequellen wie Solarthermie und oberflächennahe Geothermie oder die unternehmensübergreifende Abwärmenutzung von Branchen mit hoher WKG in Industriegebieten an. Abschließend lässt sich sagen, dass ORC Anlagen in den untersuchten Industrien keine Anwendung finden. Absorptionskälteanlagen können in vereinzelt Industriemilieus sinnvoll sein.

Fazit

Das gezeigte methodische Vorgehen ermöglicht es Effizienzsteigerungspotentiale durch Abwärmenutzung zu erschließen und die Versorgungstechnik energetisch zu optimieren. Nach der Vorgehensweise im Zwiebelschalenmodell steht im ersten Schritt die Realisierung von Wärmerückgewinnungsmaßnahmen im Vordergrund. Im zweiten Schritt erfolgt die thermodynamisch korrekte und energieeffiziente Einbindung der Versorgungsanlagen zur Deckung des verbleibenden Energiebedarfs.

Die Ergebnisse der Fallstudien zeigen, dass eine Pinch Analyse thermische Zusammenhänge im Sinne des Zwiebelschalenmodells aufzeigt, die bei der herkömmlichen Auslegung einer getrennten Erzeugung oder von Abwärmenutzungstechnologien keine Berücksichtigung finden. In allen untersuchten Branchen ist aufgrund der niedrigen Wärme-Kälte-Grenzen die Anwendung einer Absorptionskältemaschine oder einer ORC-Anlage aus Abwärme nicht möglich. Vielmehr zeigt sich, dass Wärmepumpen oder die direkte Integration von erneuerbaren Energien wie Geo- oder Solarthermie energetisch zielführende Versorgungstechnologien darstellen.

Für die fundierte Bewertung von Energieeffizienz im Bereich der thermischen Energie ist die vorgestellte Methodik aus wissenschaftlicher Sicht zu empfehlen. Die aus der Praxis berichteten Einsparpotentiale zeigen den wirtschaftlichen Erfolg der Umsetzungsmaßnahmen am Beispiel der Chemie Industrie.

Lebenslauf

Dr.-Ing. Matthias Philipp, Jahrgang 1984, Studium der der Regenerativen Energietechnik und Energieeffizienz an der Universität Kassel. Promotion am Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse der Universität Kassel. Seit 2016 Technologiefeldleiter für Energiesystemtechnik am Institut für neue Energie-Systeme der Technischen Hochschule Ingolstadt.

M. Sc. Gregor Schumm, Jahrgang 1985, Studium der der Regenerativen Energietechnik und Energieeffizienz an der Universität Kassel. Seit 2012 Dissertant am Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse der Universität Kassel. Seit 2016 im technischen Vertrieb bei Piller Blowers & Compressors GmbH.

M. Sc. Florian Schlosser, Jahrgang 1989, Studium der Regenerativen Energietechnik und Energieeffizienz an der Universität Kassel. Seit 2016 Dissertant am Fachbereich Umweltgerechte Produkte und Prozesse der Universität Kassel.

M. Sc. Ron-Hendrik Peesel, Jahrgang 1990, Duales Bachelorstudium bei Bosch Thermotechnik, Masterstudium Regenerative Energien und Energieeffizienz an der Universität Kassel, Seit 2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse der Universität Kassel

Prof. Dr.-Ing. Uwe Holzhammer, Jahrgang 1975, Studium Umwelttechnik an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin. Promotion an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock. Seit 2016 Professor für Energiesystemtechnik an der Technischen Hochschule Ingolstadt.

References

- [1] Kemp IC. Pinch analysis and process integration a user guide on process integration for the efficient use of energy. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2007.
- [2] Hesselbach J. Energie- und klimaeffiziente Produktion Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2012.
- [3] Philipp M. Steigerung der Energieeffizienz thermischer Prozesse der milchverarbeitenden Industrie: Ein systemischer Ansatz vom Bedarf bis zur Energiequelle. Dissertation. Kassel; 2016.
- [4] Bylund G. Dairy processing handbook. [Lund, Sweden]: [Tetra Pak Processing Systems AB]; 1995.
- [5] Linnhoff B. Thermodynamic Analysis in the Design of Process Networks. Dissertation. Leeds; 1979.
- [6] Klemeš JJ. Handbook of Process Integration (PI): Minimisation of Energy and Water Use, Waste and Emissions: Elsevier; 2013.
- [7] Körner H. Optimaler Energieeinsatz in der Chemischen Industrie. Chem.-Ing.-Tech 1988(7):511–8.
- [8] Atkins MJ, Walmsley MR, Neale JR. The challenge of integrating non-continuous processes – milk powder plant case study. Journal of Cleaner Production 2010;18(9):927–34.
- [9] Walmsley TG, Walmsley MR, Atkins MJ, Neale JR. Improving energy recovery in milk powder production through soft data optimisation. Applied Thermal Engineering 2013;61(1):80–7.
- [10] Walmsley TG, Atkins MJ, Walmsley MR, Neale JR. Appropriate placement of vapour recompression in ultra-low energy industrial milk evaporation systems using Pinch Analysis. Energy 2016.
- [11] Philipp M. Steigerung der Energieeffizienz thermischer Prozesse der milchverarbeitenden Industrie: Ein systemischer Ansatz vom Bedarf bis zur Energiequelle. Kassel, Hessen: Kassel University Press; 2016.
- [12] Dietrich W, Fredrich O. GEA Grasso heat pumps using ammonia - the megawatt range. Frankfurt am Main; 2012.
- [13] InvenSor GmbH. Datenblatt: InvenSor Adsorptionskältemaschine LTC 30 e plus. [September 15, 2016]; Available from: http://invensor.info/wp-content/uploads/2015/03/InvenSor_LTC30_e_plus_Datenblatt.pdf.
- [14] Zhai H, An Q, Shi L, Lemort V, Quoilin S. Categorization and analysis of heat sources for organic Rankine cycle systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016;64:790–805.
- [15] Atkins MJ, Walmsley MR, Neale JR. Integrating heat recovery from milk powder spray dryer exhausts in the dairy industry. Applied Thermal Engineering 2011;31(13):2101–6.
- [16] Jönsson J. Analysing different technology pathways for the pulp and paper industry in a European energy systems perspective. Dissertation. Göteborg: Chalmers Univ. of Technology; 2011.
- [17] Barkaoui A-E, Boldyryev S, Duic N, Krajacic G, Guzović Z. Appropriate integration of geothermal energy sources by Pinch approach: Case study of Croatia. Applied Energy 2016.