

Sektorkopplung Prozesswärme-Strom in der deutschen Industrie

Industriebild

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

Einleitung

Sektorkopplung bedeutet die Verbindung des Elektrizitäts- mit dem Wärme- und Mobilitätssektor. Während der Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) im Strombereich erhebliche Fortschritte, bis zu einem Anteil von über 30 %, erzielt hat, ist im Wärme- (ca. 13 %) und Mobilitätssektor (ca. 5,1 %) der Anteil in den letzten zehn Jahren fast konstant geblieben [1]. Die Elektrifizierung dieser Anwendungsbereiche soll den Anteil an erneuerbarer Energie erhöhen und somit zu einer Reduzierung von Treibhausgasen beitragen. Abbildung 1 zeigt, dass der Prozesswärmebedarf 25 % des deutschen Primärenergiebedarfs beträgt.

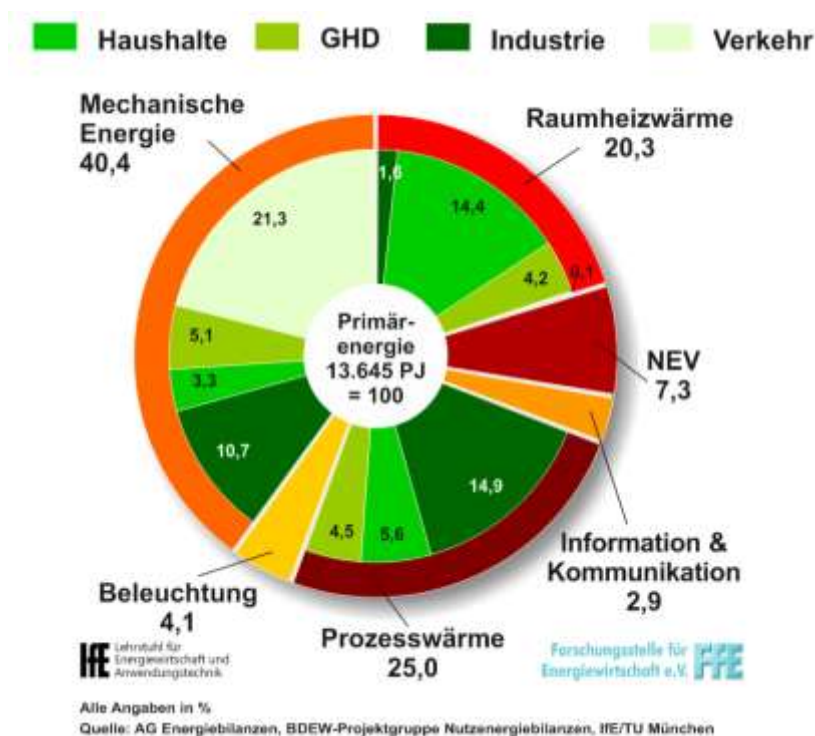


Abbildung 1: Primärenergieaufwand nach Sektoren und Anwendungsarten in Deutschland 2012 [2]

Dieser Anwendungsbereich ist somit der energetisch größte Stellhebel für die Integration von EE-Strom in den Wärmesektor. Die Motivation ist es daher zwischen fossiler und erneuerbaren, elektrischen Energieträgern zu Zeitpunkten mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien im Strommix umzuschalten. Dabei können zusätzlich die in den Industriebetrieben vorhandene thermischen Trägheiten oder Speicherkapazitäten so genutzt werden, dass die volatilen erneuerbaren Energien möglichst systemeffizient integriert werden. Khripko [3] arbeitete die Bedeutung der Nutzungsgradsteigerung von erneuerbaren Energien in Industriebetrieben für die Entlastung der Verteilnetze heraus.

Wurde bisher in Deutschland vornehmlich Erdgas als Endenergieträger und klimafreundlicher Brennstoff zur Bereitstellung von Wärme eingesetzt, könnte in den nächsten Jahren ein Umdenken stattfinden. Denn während die Treibhausgase (THG), die beim Verbrennen von Erdgas anfallen, chemisch bedingt konstant bleiben, fallen die spezifischen Emissionswerte des Stroms durch den Ausbau erneuerbarer Energien. Politisches Ausbauziel ist ein Anteil von erneuerbaren Energien am Energiemix von 80 % und die Senkung von Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um 80 % bis 2050

[4]. In Abbildung 2 wird deutlich, dass die Emissionsfaktoren von Elektrizität erheblich abnehmen und nahe denen der Erdgasverbrennung liegen. Grund hierfür ist der Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromsektor [5]. Je nach Zielerreichungsgrad sind Szenarien mit einem spezifischen THG-Emissionspotenzial von 0 g/kWh im Jahr 2050 denkbar [6].

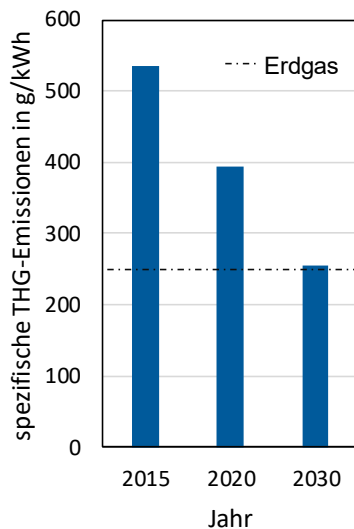


Abbildung 2: Prognostizierte zeitliche Entwicklung der spezifische THG-Emissionen für das Deutsche Stromnetz (Balken) im Vergleich zu Erdgas (Linie) (Daten aus GEMIS)

Aktuelle Untersuchungen von Philipp et al. zeigen [7], [8], [9], dass bereits heute durch den Einsatz von Wärmepumpen eine effiziente Bereitstellung von Prozesswärme möglich ist. Dies stellt jedoch nur eine von verschiedenen Sektorkopplungsoptionen im Power-To-Heat-Bereich dar.

Technologien der Sektorkopplung

Für die Substitution von erdgasbefeuerten Wärmesystemen durch alternative elektrische Technologien eignen sich Widerstandsheizungen, Elektrodenkessel (EDK) und Wärmepumpen (WP). Ab dem Jahr 2030 ergibt sich in Deutschland ein Treibhausgasreduzierungs- und Treibhausgasemissionspotenzial für die drei Technologien durch die Steigerung des Anteils an erneuerbaren Energien im deutschen Strommix. In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten Eigenschaften der drei Sektorkopplungstechnologien gegenübergestellt.

Tabelle 1: Vergleich von Sektorkopplungstechnologien im Power-To-Heat-Bereich

Technologie	Widerstandsheizung	Elektrodenkessel	Wärmepumpe
Maximaler Temperaturbereich	Bis ca. 200 °C [10]	Anwendungsbeispiele bis 350 °C [11]	110 °C [12] Prototypen 170°C
Leistungsbereich	Wenige kW bis im zweistelligen MW-Bereich	Bis 60 MW [13]	Bis 20 MW _{thermisch} [12]
Notwendiger Stromeinsatz zur Deckung von 100 % Nutzenergie	1 - 1,01	1 – 1,01	0,2 - 0,33
Regelung, Besonderheiten	Aufwändige Leistungsregelung, Mindestleistung notwendig [14]	Stufenlos im gesamten Leistungsspektrum, keine Mindestleistung notwendig, schnelle Leistungsregelung [14]	Gleichzeitigkeit von Wärmequelle und Wärmesenke erforderlich

		Leitfähigkeit muss hinreichend klein sein (Regelung auf 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$), da Wasser Widerstand darstellt [15]	
Spezifische Investitionskosten (Faustregel)	100 €/kW [16]	50 - 600 €/kW [17]	250 - 700 €/kW [18]

Die Einbindung von Widerstandsheizungen und Elektrodenkessel erfolgt analog zum konventionellen Kessel in den bestehenden Versorgungskreislauf (z. B. Heißwasserkreislauf). Die Kosten für Elektrodenkesseln sind sehr stark von der installierten Leistung abhängig. Die spezifischen Investitionskosten sind für thermische Leistungen ab 20 MW deutlich geringer als im kleinen Leistungsbereich. Die Integration einer Wärmepumpe ist dann besonders effizient, wenn Kühl- (Wärmequelle) und Heizlast (Wärmesenke) korrekt gekoppelt sind. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, in welchen Branchen welche Technologien geeignet sind.

Prozesswärme nach Temperaturniveaus

Ein Kriterium, das den Einsatz der jeweiligen Technologie bestimmt, ist das Temperaturniveau der Wärmeanwendungen. Abbildung 3 zeigt den Wärmebedarf nach Temperaturbereichen und Branchen. Die Abbildung verdeutlicht, dass der Prozesswärmebedarf mit Temperaturen unter 100 °C in der chemischen Produktion, Lebensmittel & Getränkeindustrie sowie in der Papier- und Kartonherstellung am größten ist. Diese Industriebereiche sind aufgrund der vergleichsweise niedrigen Temperaturen und des hohen Potenzials daher besonders interessant für die effiziente Integration von Prozesswärme.

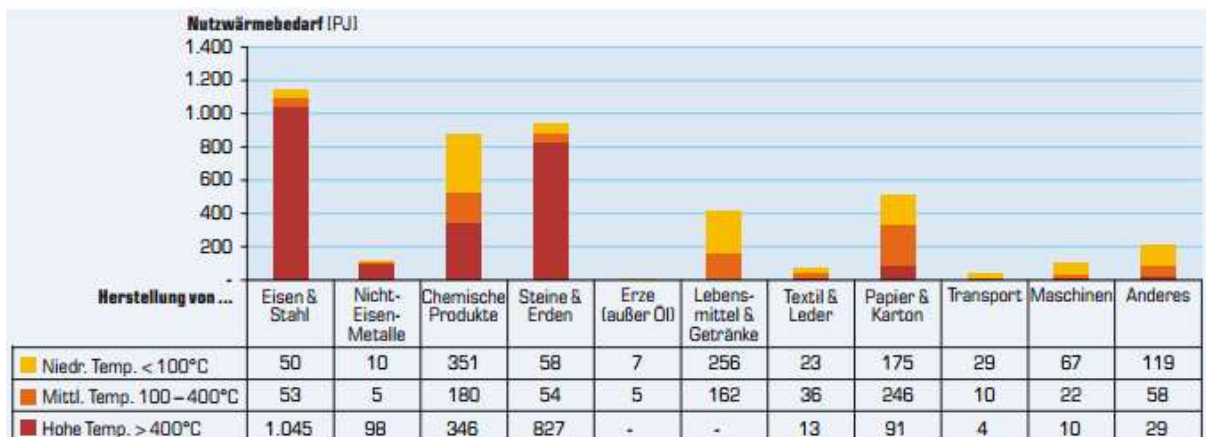


Abbildung 3: Nutzwärmebedarf nach Temperaturbereich und Branchen [19]

Wolf et al. [18] arbeiteten ebenfalls eine besondere Bedeutung der Nahrungsmittel-, Chemie-/Pharmasowie der Papierindustrie als Industriezweige mit Anwendungspotenzial für Wärmepumpen in der DACH¹-Region heraus. In Zweigen wie der Metallverarbeitung, Metalle und Mineralien wird von einem geringen Potenzial ausgegangen, da neben dem hohen Temperaturbereich, günstige Abwärme zur Verfügung steht.

Anwendungsbereiche in der Industrie und richtige thermische Applikation von Power-to-Heat-Technologien

Die Optimierung des Gesamtsystems ist Zielsetzung einer energieeffizienten Integration von Versorgungsanlagen in das thermische System. Das thermodynamische System eines Prozesses oder einer ganzen Fabrik lässt sich mittels der Methoden der Pinch-Analyse [20] untersuchen. Zur Durchführung einer Pinch-Analyse sind sämtliche Wärmeströme mit Massenstrom, spezifischer

¹ Deutschland, Österreich und Schweiz

Wärmekapazität, Ein- und Austrittstemperatur aufzunehmen. Anschließend werden diese grafisch nach Temperatur und Leistung geordnet als Quellen- und Senkenprofile dargestellt. Neben den möglichen Wärmerückgewinnungszielen lassen sich, in Form der Großverbundkurve (GVK), Temperatur und Leistungsbereich des verbleibenden Bedarfs für Heizen \dot{Q}_H und Kühlen \dot{Q}_K ablesen [21]. Kennzeichnend für jedes System ist dabei die Wärme-Kälte-Grenze (WKG), auch Pinch-Temperatur genannt, die das System in einen Bereich mit Kühlbedarf (unterhalb der WKG) und einen Bereich mit Wärmebedarf (oberhalb der WKG) teilt. Anhand dieser charakteristischen Temperatur lässt sich die Integration von Bereitstellungstechnologien argumentieren [8]. Insbesondere bei der Implementierung von Wärmepumpen kann eine korrekte Integration große Effizienzpotenziale erschließen, eine falsche den Energiebedarf sogar erhöhen (vgl. Abbildung 4).

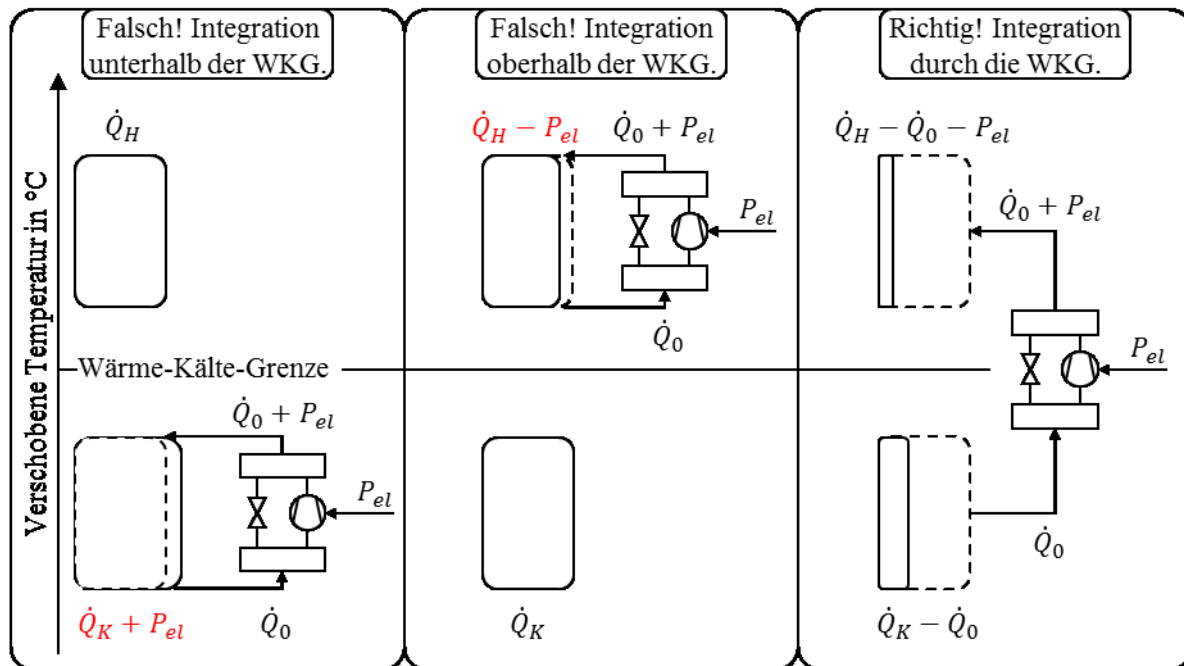


Abbildung 4: Integrationsmöglichkeiten der Wärmepumpe (WP) um die WKG und Auswirkung auf den verbleibenden Energiebedarf (gestrichelt ohne WP, durchgezogen mit WP) in Anlehnung an Kemp [18]

Während eine Einbindung unterhalb oder oberhalb der WKG gegebenenfalls zu einer Erhöhung des Bedarfes ($\dot{Q}_K + P_{el}$) führt, sinkt, im Falle einer Implementierung durch die WKG hinweg, sowohl der Kälte- als auch der Wärmebedarf drastisch. Auf diese Weise entzieht die Wärmepumpe dem System Wärmeleistung \dot{Q}_0 unterhalb der WKG und führt diese mittels elektrisch angetriebener Verdichtung (P_{el}) auf höherem Temperaturniveau zur Deckung des Heizbedarfes ($\dot{Q}_H - \dot{Q}_0 - P_{el}$) zu. Die notwendige elektrische Energie zum Antrieb des Verdichters ist dabei von der Temperaturerhöhung und der Heiz- bzw. Kühlleistung abhängig.

Mithilfe der GVK lässt sich die Bereitstellung von Wärme und Kälte (z.B. mittels Wärmepumpe) auf entsprechendem Temperaturniveau unter Berücksichtigung des Wärmerückgewinnungspotenzials argumentieren. Form der Großverbundkurve und Lage der WKG bestimmen dabei explizit die Dimensionierung und Ausführung der Wärmepumpe. Für einige Industriezweige lassen sich branchentypische GVK-Profile und WP-Einsatzmöglichkeiten ableiten. Die thermodynamischen Grundsätze sind bei der WP-Implementierung besonders relevant, da diese die kalte und warme Seite des Systems vernetzt. Die Integration von Hochtemperaturanwendungen, wie Widerstandsheizung und Elektrodendampfkessel, lassen sich mit Hilfe der Pinch-Analyse sehr gut planen (vgl. \dot{Q}_{EDK} in Abbildung 5).

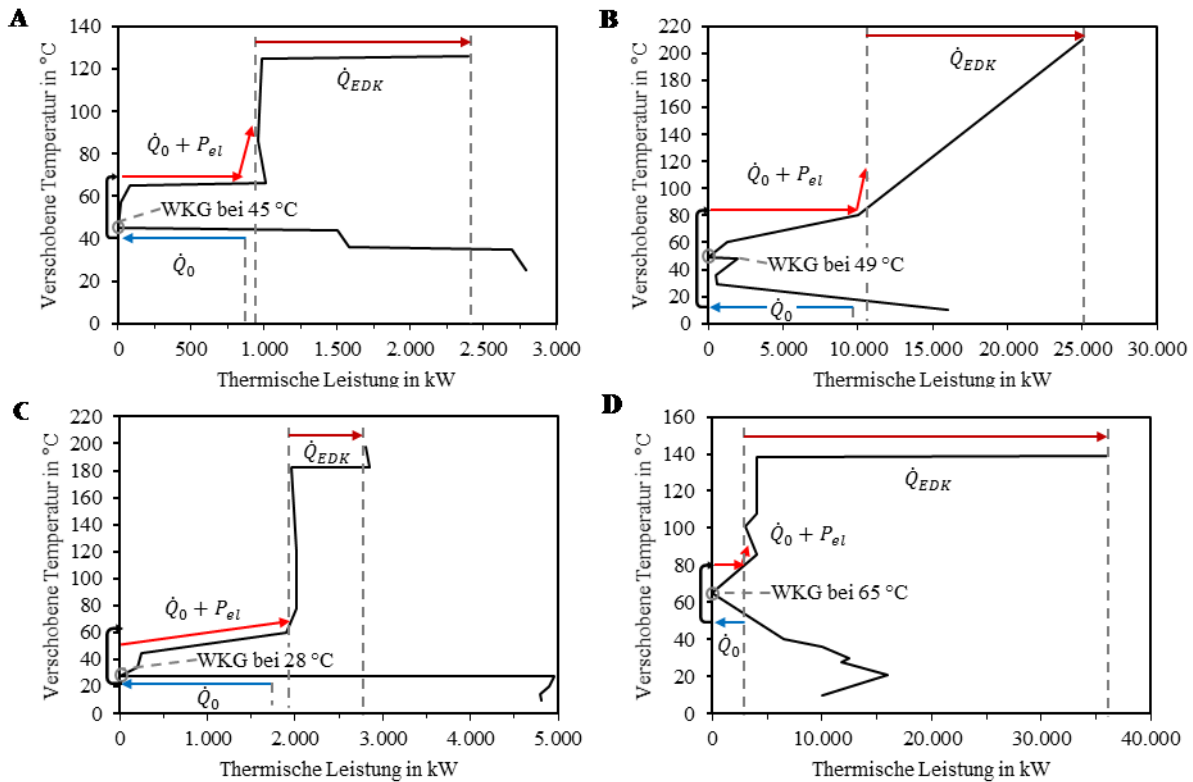


Abbildung 5: WP- und EDK-Integration anhand der GVK eines **A** Extraktionsbetriebs (Perkolator, Mazeration) für pflanzliche Trockensubstanzen [22], einer **B** Milchtrocknung [23], einer **C** Fleischverarbeitung [24] sowie einer **D** Papierproduktion [25]

Während im Extraktionsbetrieb (**A**) und in der Papierproduktion (**D**) einstufige Wärmepumpe auf verschiedenen Temperaturniveaus Einsatz finden, ist für den Milchtrocknungsbetrieb (**B**) eine zweistufige Temperaturerhöhung vorzusehen. Üblicherweise wird in diesem Fall die Rückkühlwärme der NH_3 -KKM nach dem Verdichter ausgekoppelt und durch eine Wärmepumpe auf das Temperaturniveau von 80 °C gehoben [26]. In einem fleischverarbeitenden Betrieb (**C**), in welchem viel Brauchwarmwasser vorzuwärmen ist, bietet sich die Integration einer CO_2 -WP an. Diese zeichnet sich durch eine überkritische Betriebsweise aus und ist somit für die Vorwärmung von Prozessströmen über einen hohen Temperaturbereich prädestiniert [18]. Zur Deckung der höheren Prozesstemperaturen ($> 100\text{ °C}$) sind in der Regel Elektrodendampfkessel einzusetzen, da dampfauskoppelnde Wärmepumpen nur in Ausnahmefällen (sehr hohen WKG) effizient im System zu integrieren sind.

Schlussfolgerung

Wärmepumpen können in bestimmten Branchen ein Mittel sein, um energieeffizient und klimafreundlich erneuerbare Energien in die Prozesswärmebereitstellung zu integrieren. Besonders geeignet sind hierfür lebensmittelverarbeitende Betriebe und die chemische Prozessindustrie. Wichtig ist dabei die thermodynamisch korrekte Einbindung mittels Pinch-Analyse in das System.

Bei hohen Prozesstemperaturen sind Widerstandsheizsysteme und Elektrodenkessel geeignet, um Sektorkopplung auch in diesen Temperaturniveaus zu realisieren. Jedoch sind diese für eine Grundlastintegration voraussichtlich erst ab dem Jahr 2030 aus THG-Minderungs-Perspektive interessant. Derzeit können Sie nur als Wärmequelle zu Zeitpunkten mit großen Anteilen erneuerbarer Energien im Stromnetz klimafreundlich eingesetzt werden. Dies liegt darin begründet, dass durch den Ausbau der erneuerbaren Energien nicht nur der spezifische Emissionsfaktor sinkt, sondern es durch Fluktuation in der Erzeugung auch zu einer Verlagerung der Zeitpunkte, an denen klimafreundlich produziert wird, kommt. Dadurch kann der zeitlich abhängige Emissionsfaktor von Strom deutlich unter den Wert von Erdgas fallen.

Die Auswirkung der Flexibilität der Last und der ökologisch sinnvollste umfängliche Einsatzzeitpunkt sind weitere Forschungsfragen, die im nächsten Jahr in ihren Wechselwirkungen mit Energieeffizienz am Institut für neue Energie-Systeme bearbeitet werden.

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 Bereichsleiter für Energiesystemtechnik am Institut für neue Energie-Systeme der Technischen Hochschule Ingolstadt.

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

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.

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.

Literaturangaben

- [1] Umweltbundesamt: Erneuerbare Energien in Zahlen, 2016.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#textpart-1>, abgerufen am: 11.09.2017
- [2] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.: Primärenergieaufwand nach Sektoren und Anwendungsarten in Deutschland 2012, München 2012. <https://www.ffe.de/die-themen/erzeugung-und-markt/287-informationen-zum-energieverbrauch-in-deutschland-2012>, abgerufen am: 11.09.2017
- [3] Khripko, D.: Flexibilisierung des industriellen Energiebedarfes, Dissertation 2016
- [4] Klimaschutzplan 2050, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit u. www.bmub.bund.de, Berlin 2016
- [5] "Leitstudie 2010". BMU - FKZ 03MAP146, Nitsch, J., Pregger, T., Scholz, Y., Naegler, T., Sterner, M., Gerhardt, N., Oehsen, A. von, Pape, C., Sain-Drenan, Y.-M. u. Wenzel, B., 2010
- [6] Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, Benndorf, R., Bernicke, M., Bertram, A., Butz, W., Dettlingen, F., Drotleff, J., Elsner, C., Fee, E., Gabler, C., Galander, C., Hargita, Y., Herbener, R., Hermann, T., Jäger, F., Kanthak, J., Kessler, H., Koch, Y., Kuntze, D., Lambrecht, M., Lehmann, C., Lehmann, H., Leuthold, S., Lütkehus, I., Kerstin, M., Müller, F., Müschen, K., Nissler, D., Plickert, S., Schubert, J., Schluz, D., Strenge, U., Sieck, M., Westmann, B., Werner, K., Winde, C., Wunderlich, D. u. Zietlow, B., Dessau-Roßlau 2013
- [7] Philipp, M., Schumm, G., Peesel, R.-H. u. Hesselbach, J.: Industrial energy supply structures with low primary energy demand and emissions for different countries considering Energy Transitions. Chemical Engineering Transactions (2016) Vol. 52, S. 175–180

- [8] Philipp, M.: Steigerung der Energieeffizienz thermischer Prozesse der milchverarbeitenden Industrie. Ein systemischer Ansatz vom Bedarf bis zur Energiequelle. Produktion & Energie, Bd. 12. Kassel, Hessen: Kassel University Press 2016
- [9] Philipp, M., Schumm, G., Peesel, R.-H., Walmsley, T. G., Atkins, M. J., Schlosser, F. u. Hesselbach, J.: Optimal energy supply structures for industrial food processing sites in different countries considering energy transitions. Energy (2017)
- [10] ELWA Elektro-Wärme GmbH & Co. KG: Power to Heat, Maisach 2017. <https://www.elwa.com/de/rtr-units/pth-power-to-heat/>, abgerufen am: 13.11.2017
- [11] Parat Halvorsen AS: Parat Elektrodenkessel, Flekkefjord 2017. <http://www.parat.no/de/referenzen/parat-elektrodenkessel/>, abgerufen am: 13.11.2017
- [12] Wolf, S.: Wärmepumpen:Entwicklungsstand und Perspektiven. Vortrag am Institut für thermische Energietechnik (ITE) der Universität Kassel. Kassel 2016
- [13] Parat Halvorsen AS: Hochspannungs Elektrodenkessel. von ENERGIE zu Wärme für Dampf- und Heißwasser, Flekkefjord 2017. <http://www.parat.no/media/204904/high-voltage-electrode-boiler-web-de.pdf>, abgerufen am: 13.11.2017
- [14] Eller, D.: Integration erneuerbarer Energien mit Power-to-Heat in Deutschland. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2015
- [15] GETEC heat & power GmbH: Power-To-Heat Anlage: Aufbau und Funktionsweise, Magdeburg 2017. http://www.getec-heat-power.de/de/technologien/power-to-heat/index.html#Aufbau_und_Funktionsweise, abgerufen am: 13.11.2017
- [16] Schwill, J.: Power-to-Heat (PtH) und Regelenergie - Was sind Vorund Nachteile?, Köln 2017. <https://www.next-kraftwerke.de/energie-blog/power-to-heat-ptH-regelenergie>, abgerufen am: 24.10.2017
- [17] Götz, M.: Economic Potential of the “Power-to-Heat” Technology in the 50Hertz Control Area. Dresden: Universität Leipzig 2013. https://tu-dresden.de/bu/wirtschaft/ee2/ressourcen/dateien/dateien/ordner_enerday/ordner_enerday2013/ordner_vortrag/Gtz-et.al._Paper_Power-To-Heat_Enerday_130415.pdf?lang=de, abgerufen am: 27.11.2017
- [18] Systematische Anwendung von Großwärmepumpen in der Schweizer Industrie, Wolf, S., Flatau, R., Radgen, P. u. Blesel, M., Bern 2017
- [19] Brunner, Christoph u. Glatzl, W.: Solare Prozesswärme weltweit im Aufwärtstrend, 2012. http://www.aee.at/aee/index.php?option=com_content&view=article&id=837&Itemid=113, abgerufen am: 29.11.2017
- [20] Kemp, I. C.: Pinch analysis and process integration a user guide on process integration for the efficient use of energy. Oxford: Butterworth-Heinemann 2007
- [21] Philipp, M., Schumm, G., Schlosser, F., Peesel, R.-H. u. Holzhammer, U.: Grundsatzfragen der Abwärmenutzung. BWK Das Energie-Fachmagazin (2017) 4, 36-39
- [22] Extraktionsbetrieb. Pinch-Analyse Prozessanlagen, Felder, P., Flückinger, U. u. Weisskopf, T., Ittigen 2015
- [23] Atkins, M. J., Walmsley, M. R.W. u. Neale, J. R.: Integrating heat recovery from milk powder spray dryer exhausts in the dairy industry. Applied Thermal Engineering 31 (2011) 13, S. 2101–2106
- [24] Fritzon, A. u. Berntsson, T.: Efficient energy use in a slaughter and meat processing plant—opportunities for process integration. Journal of Food Engineering 76 (2006) 4, S. 594–604
- [25] Jönsson, J.: Analysing different technology pathways for the pulp and paper industry in a European energy systems perspective, University of Göteborg Dissertation. Göteborg 2011
- [26] Kapustenko, P., Ulyev, L., Boldryev, S. u. Garev, A.: Integration of a heat pump into the heat supply system of a cheese production plant. Energy 33 (2008) 6, S. 882–889