

# Steigerung der Energieeffizienz in Österreichs Industrie durch innerbetriebliche Abwärmenutzung mittels Wärmepumpensystemen anhand zweier Beispiele

Gerald Zotter, René Rieberer

Institut für Wärmetechnik, TU Graz, Inffeldgasse 25/B, 8010 Graz, Tel.: +43(0)316 873 7301, [gerald.zotter@tugraz.at](mailto:gerald.zotter@tugraz.at), [www.iwt.tugraz.at](http://www.iwt.tugraz.at)

**Kurzfassung:** Industrielle Abwärmen, die aufgrund ihres Temperaturniveaus nicht direkt genutzt werden können und i.d.R. „entsorgt“ werden müssen, könnten mittels Wärmepumpensystemen für innerbetriebliche Heiz- und/oder Kühlzwecke genutzt werden. Dadurch kann ein großes, bisher brachliegendes Potential zur Energieversorgung erschlossen und ein signifikanter Beitrag zur Reduktion fossiler Brennstoffe erreicht werden. In dieser Arbeit werden beispielhaft dafür technische, ökologische und ökonomische Aspekte einer potentiellen Anwendung einer elektrisch angetriebenen Wärmepumpe in einem metallverarbeitenden Betrieb, sowie einer bereits realisierten Anwendung einer thermisch angetriebenen Wärmepumpe in einem holzverarbeitenden Betrieb vorgestellt. Beide Anwendungen unterstreichen das ökologische Potential der innerbetrieblichen Abwärmenutzung mittels Wärmepumpen, da ca. 180 kg bzw. 140 kg an CO<sub>2</sub> pro MWh an gelieferter Heizwärme im Vergleich zu konventionellen Wärmeversorgungssystemen eingespart werden könnte bzw. wird.

**Keywords:** Abwärmenutzung, Wärmepumpe, Industrie

## 1 Einleitung

Österreichs Industrie ist lt. Statistik Austria (2010) für etwa ein Drittel des gesamten heimischen Endenergiebedarfs verantwortlich (siehe Abbildung 1), wobei beinahe die Hälfte davon mit Erdgas, Erdöl und Kohle (siehe Abbildung 2) gedeckt wird. Damit ist eine Reduktion von fossilen Brennstoffen in diesem Sektor zur Erreichung von Österreichs Klimazielen unerlässlich, da die heimische Industrie eine der Hauptemittenten von anthropogenen, klimarelevanten Treibhausgasen ist. (Zotter & Rieberer, 2013)

Sowohl die Steigerung der Energieeffizienz innerhalb der Produktion als auch eine verstärkte Nutzung regenerativer Energieträger, wie Sonne, Umweltwärme, Biomasse etc. und regenerierbare Energie, wie betriebliche Abwärme ermöglicht eine maßgebliche Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesem relevanten Sektor. Neben den ökologischen Vorteilen senkt eine effiziente und nachhaltige Energieversorgung der heimischen Industrie auch die Importabhängigkeit Österreichs an fossilen Brennstoffen. (Vehovec et al., 2012)

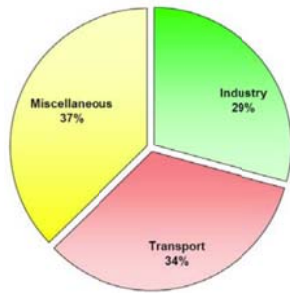


Abbildung 1: Prozentueller Anteil der Sektoren am österreichischen Endenergieverbrauch für 2009 (Statistik Austria, 2010)

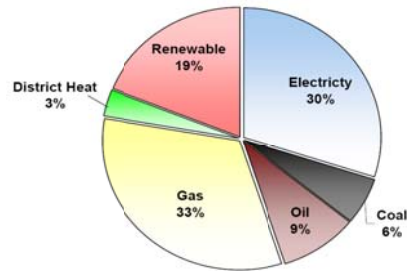


Abbildung 2: Anteil der Endenergieträger in der österreichischen Industrie 2009 (Statistik Austria, 2010)

## 2 Innerbetriebliche Abwärmenutzung mittels Wärmepumpen

I.d.R. fallen in der Industrie enorme Abwärmemengen aus unterschiedlichsten Produktionsprozessen an, welche meist mit zusätzlichem Aufwand „entsorgt“ werden müssen. Abwärmen, die aufgrund ihres Temperaturniveaus nicht direkt genutzt werden können, könnten mittels Wärmepumpen auf ein nutzbares Temperaturniveau für Heizzwecke angehoben bzw. in thermischen Kältemaschinen für Kühlzwecke genutzt werden. Dadurch kann ein großes, bisher brachliegendes Potential zur Energieversorgung erschlossen und ein signifikanter Beitrag zur Reduktion des Primärenergieverbrauches bzw. des damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Ausstosses erreicht werden, wie in Abbildung 3 bildhaft dargestellt. (Zotter & Rieberer, 2013a)

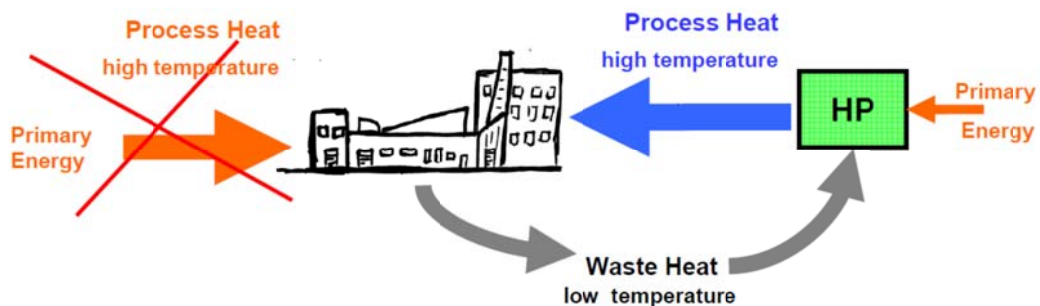


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Prinzips der innerbetrieblichen Abwärmenutzung mittels Wärmepumpen (Zotter & Rieberer, 2010)

### 2.1 Industrielle Abwärme als Wärmequelle

Das Temperaturniveau der industriellen Abwärme liegt mit ca. 30 bis 60°C deutlich über dem von konventionellen Wärmequellen, wie Geo-, Hydro- oder Aerothermie. Somit stellt industrielle Abwärme aus exergetischer Sicht eine besonders wertvolle Wärmequelle dar. Die Erschließung dieser ist zwar meist mit zusätzlichen Investitionen verbunden, die daraus gewonnene Wärme steht allerdings im Betrieb „kostenlos“ zur Verfügung. Zusätzlich entfallen i.d.R. Betriebskosten für die „Abwärmeentsorgung“, wie z.B.: für den Betrieb von Ventilatoren einer Rückkühlanlage. (Zotter & Rieberer, 2013a)

## 2.2 Ökologisches Potential

Durch den Einsatz von Wärmepumpen könnten z.B. lt. Lambauer et al. (2008) in Deutschlands Industrie im Vergleich zu konventionellen Wärmeerzeugern Emissionseinsparungen von durchschnittlich 49% erzielt werden. Da der österreichische Emissionsfaktor für den elektr. Strom kleiner ist als jener in Deutschland, kann davon ausgegangen werden, dass das österreichische Einsparpotential prozentuell höher ist.

Im Rahmen der Beteiligung am internationalen Vorhaben der IEA HPP „Application of industrial heat pumps“ (IEA HPP, 2010) hat das IWT gemeinsam mit dem AIT eine Studie (Rieberer et al., 2011a und 2011b) zur Abschätzung des Potentials von Wärmepumpen in der österreichischen Industrie durchgeführt. Dazu wurden der jeweilige Wärmebedarf und das vorhandene Abwärmepotential mit den entsprechenden Temperaturniveaus für unterschiedliche Branchen hinterleuchtet. Lt. Rieberer et al. (2011a und 2011b) könnten theoretisch rd. 30% des Nutzwärmebedarfs von insgesamt 228 PJ/a der österreichischen Industrie durch Wärmepumpen für Nutzwärmetemperaturen bis ca. 100°C abgedeckt werden. Um nicht nur ein theoretisches sondern auch ein umsetzbares, technisches Potential zu bestimmen, müssten jedoch die unterschiedlichen Produktionsprozesse im Detail betrachtet werden, da vor allem die temporäre Deckung des Abwärmeangebots mit dem Prozesswärmebedarf einen maßgeblichen Einfluss auf das nutzbare Potential hat.

## 2.3 Wärmepumpensysteme für die innerbetriebliche Abwärmenutzung

Wärmepumpen, die u.a. in der Industrie zur innerbetrieblichen Nutzung von Abwärme eingesetzt werden, werden i.d.R. als „Industriewärmepumpen“ bzw. „industrielle Wärmepumpe“ bezeichnet (vgl. Jacobs, 2010). Meist handelt es sich dabei um „maßgeschneiderte“ Wärmepumpen größerer Leistung (von 100 kW bis mehrere MW).

### 2.3.1 Kreisläufe

Zahlreiche elektrisch wie auch thermisch angetriebene Wärmepumpensysteme bzw. –kreisläufe (siehe Abbildung 4) können theoretisch eingesetzt werden, um industrielle Abwärme für die innerbetriebliche Wärme- bzw. auch Kälteversorgung nutzbar zu machen.

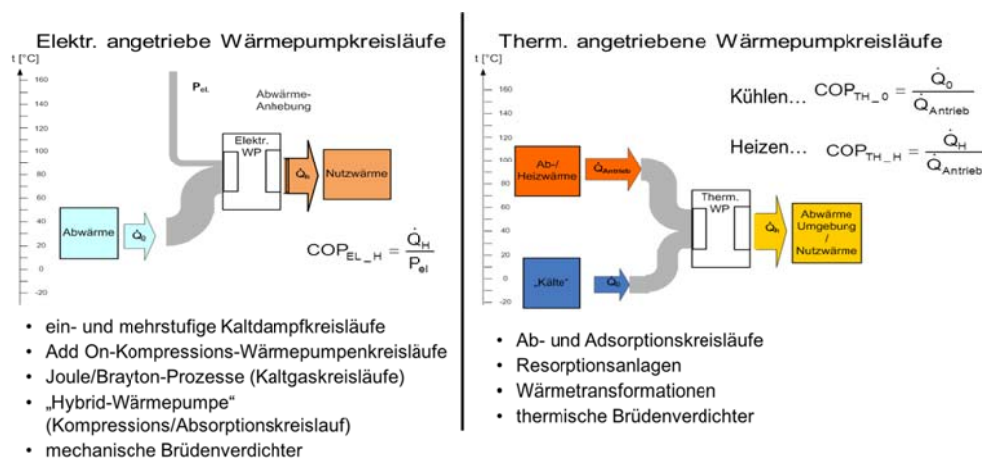


Abbildung 4: Elektrisch und thermisch angetriebene Wärmepumpensysteme für die industrielle Anwendung (Zotter & Rieberer, 2013b)

Das Nutztemperaturniveau und auch das Temperaturniveau der Wärmequelle liegen bei der Nutzung von Abwärme für die innerbetriebliche Prozesswärmeversorgung deutlich über denen von konventionellen Heizungs- oder Brauchwasseranwendungen. Für Nutztemperaturniveaus über 80°C sind i.d.R. spezielle „Hochtemperatur-Wärmepumpen“ erforderlich. Dabei handelt es sich einerseits meist um elektrisch angetriebene Kompressions-Wärmepumpen mit ein- oder mehrstufigen Kaltdampfkreisläufen und neuen Hochtemperatur-Kältemitteln. Bzgl. der Eignung von Kältemitteln ist neben der volumetrischen Kälteleistung die Drucklage bei der Hochtemperaturanwendung entscheidend, da der Kondensationsdruck bei Temperaturen von 80°C von handelsüblichen Kältemitteln meist zu hoch ist. Besonders HFKWs neuerer Generation, wie z.B. R227ea (Heptafluorpropan), R245fa (Pentafluorpropan) oder R236fa (Hexafluorpropan) eignen sich aufgrund ihrer thermodynamischen Eigenschaft für Hochtemperaturanwendungen, wobei ihr Treibhauspotential bei der Auswahl berücksichtigt werden sollte. Um diesem Problem auszuweichen, können auch natürliche Kältemittel, wie Iso-Butan (R600a) oder n-Butan (R600), CO<sub>2</sub> (R744), Ammoniak (R717) oder Wasser (R718) eingesetzt werden, welche praktisch kein Treibhauspotential besitzen.

Weiters eignen sich auch elektrisch angetriebene Kompressions/Absorptions-Wärmepumpen bzw. s.g. Hybrid-Wärmepumpen für hohe Nutztemperaturniveaus, da der Hochdruck bei diesen Anlagen infolge der Verwendung eines Lösungsmittels verglichen mit dem reinen Kältemittel gesenkt werden kann (Nordvedt, 2005). In Abbildung 5 ist zum Vergleich links eine einstufige Kompressions- und rechts eine Hybrid-Wärmepumpe schematisch dargestellt.

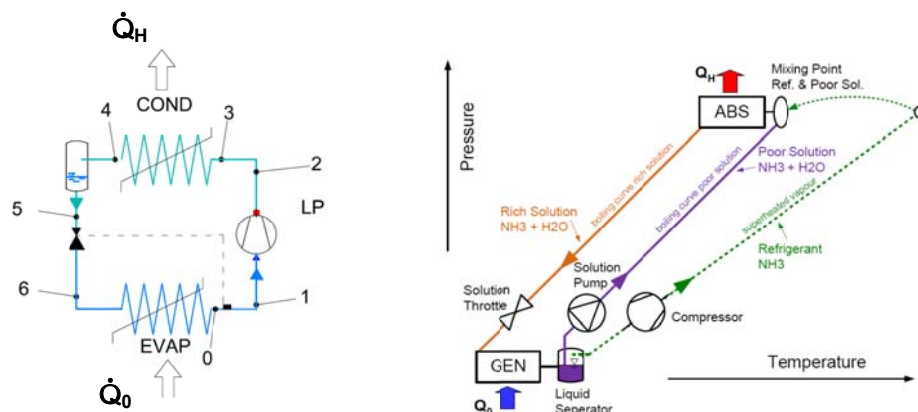


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer einstufigen Kompressionswärmepumpe (links) und Hybrid-Wärmepumpe (rechts) (Moser et al., 2011)

Brüdenverdichter sind lt. (Rieberer et al., 2014) für viele Trocknungsprozesse bereits Standard, aber auch Ab- & Adsorptionswärmepumpensysteme sind in der Industrie bereits in Verwendung. Diese thermisch angetriebenen Wärmepumpensysteme können neben Heizzwecken auch zur Generierung von „Kälte“ aus der industriellen Abwärme, bei ausreichend hohem Temperaturniveau, genutzt werden.

### 2.3.2 Effizienz

Die Effizienz von Wärmepumpensystemen wird mit dem aus dem englischen Sprachgebrauch kommend, COP (Coefficient of Performance) angegeben. Der COP einer elektrisch angetriebenen Wärmepumpe fürs Heizen ( $COP_{el,H}$ ) ist das (momentane) Verhältnis aus

abgegebener Wärmeleistung ( $\dot{Q}_h$ ) zur aufgenommenen elektr. Antriebsleistung ( $P_{el}$ ) in einem bestimmten Betriebspunkt (siehe Abbildung 4) gemäß Glg.(1).

$$COP_{el-H} = \dot{Q}_h / P_{el} \quad (1)$$

Der COP für den Heizfall einer thermisch angetriebenen Wärmepumpe ( $COP_{el-H}$ ) ist ebenso das (momentane) Verhältnis aus abgegebener Wärmeleistung ( $\dot{Q}_h$ ) jedoch zur aufgenommenen thermischen Antriebsleistung ( $\dot{Q}_{Antrieb}$ ) in einem bestimmten Betriebspunkt (siehe Abbildung 4) gemäß Glg.(2).

$$COP_{th-H} = \dot{Q}_h / \dot{Q}_{Antrieb} \quad (2)$$

Zur energetischen Bewertung der Wärmepumpeneffizienz während einer bestimmten Zeitdauer wird mit dem aus dem englischen Sprachgebrauch kommend SPF (Seasonal Performance Factor) angegeben. Für elektr. angetriebene Wärmepumpensysteme ist dieser gemäß Glg. (3) als Verhältnis von gelieferter Nutzwärmeenergie ( $Q_h$ ) zur verbrauchten elektrischen Antriebsenergie ( $W_{el}$ ) während einer Heizsaison oder eines Jahres definiert. Für thermisch angetriebene Wärmepumpensysteme ergibt sich der  $SPF_{th-H}$  gemäß Glg. (4) als Verhältnis von gelieferter Nutzwärmeenergie ( $Q_h$ ) zur verbrauchten Antriebswärme ( $Q_{Antrieb}$ ) einer Heizsaison oder eines Jahres.

$$SPF_{el-H} = Q_h / W_{el} \quad (3)$$

$$SPF_{th-H} = Q_h / Q_{Antrieb} \quad (4)$$

Der SPF ist kleiner als der COP, da dieser auch Teillast-, Anfahr- und Stillstands-Verluste der Anlage berücksichtigt. Der SPF muss aber über ein geeignetes Monitoring nach erfolgter Installation der Anlage messtechnisch erfasst oder über aufwendige Jahressimulationen ermittelt werden. Daher wird zur Bewertung vorab meist der COP für bestimmte Betriebspunkte zum Vergleich herangezogen.

## 2.4 Marktbarrieren

Bis dato gibt es trotz der o.a. ökologischen Vorteile lt. Rieberer et al. (2011b) nur sehr wenige realisierte industrielle Anwendungen in Österreich. Die Gründe dafür sind mannigfaltig: Einerseits deckt der Markt den Bedarf an Hochtemperatur-Wärmepumpen für die benötigten relativ hohen Temperaturniveaus nur bedingt, andererseits dürften auch die von der Industrie geforderten (sehr) kurzen Amortisationszeiten und fehlende Erfahrung mit realisierten Anlagen nachteilig für eine größere Verbreitung sein.

## 3 Wärmepumpensysteme in Österreichs Industrie

Im Zuge der Beteiligung am IEA HPP Annex 35 (Rieberer et al., 2014) wurde versucht, mögliche Best-Practise-Beispiele von Wärmepumpen in Österreichs Industrie zu eruieren.

Über diesen Weg konnten einige Anwendungen erhoben werden. Unter diesen bereits realisierten Anlagen befinden sich sowohl Brüdenverdichter z.B. in Bergbau-Unternehmen als auch Kompressions-Wärmepumpen in der Lebensmittel- oder Mineralölindustrie und verschiedene Absorptionswärmepumpenanwendungen in unterschiedlichen Branchen. In dieser Arbeit wird beispielhaft eine potentielle Anwendung einer elektrisch und einer bereits realisierten thermisch angetriebenen Wärmepumpe in zwei österreichischen Industriebetrieben vorgestellt.

### **3.1 Elektrisch angetriebene Wärmepumpe in einem Metall verarbeitenden Betrieb<sup>1</sup>**

Im Rahmen eines nationalen Projektes (Vehovec et al., 2013) wurde eine Machbarkeitsstudie über den potentiellen Einsatz einer elektr. angetriebenen Wärmepumpe zur Nutzung von Abwärme durchgeführt. Im Konkreten sollte bis dato ungenutzte Kondensationsabwärme eines bestehenden Kaltwassersatzes eines heimischen Metall verarbeitenden Betriebs mit einem Temperaturniveau von ca. 45°C mittels einer Kompressionswärmepumpe auf ein nutzbares Temperaturniveau von ca. 80°C zur Prozesswärmeversorgung angehoben werden (siehe Abbildung 6). In diesem Projekt wurden technische, wirtschaftliche und ökologische Kriterien verschiedener Wärmepumpen beleuchtet, Konzepte zur Einbindung dieser in den Betrieb erarbeitet und hinsichtlich einer möglichen Umsetzung priorisiert. Die Ergebnisse dienen dem Industriebetrieb als Entscheidungsgrundlage für bzw. gegen eine mögliche Realisierung.

#### **3.1.1 Abwärmepotential und Prozesswärmebedarf**

Der bestehende Kaltwassersatz dient zur Kühlung der Schweißautomaten im Werk. Das zeitlich verfügbare Abwärmepotential (abgegebene Wärmeleistung der Luftkondensatoren) des Kaltwassersatzes wurde messtechnisch bei üblicher Auslastung der Schweißapparate für eine repräsentative Woche erhoben. Die Messung zeigte, dass ca. 70 kW mit einem Temperaturniveau von ca. 40°C nutzbar sind. Der Kaltwassersatz wurde bereits mit einem bestehenden Niedertemperatur-Wärmerückgewinnungskreis (Temperaturniveau ca. 40°C) ausgestattet. Diese Niedertemperatur-Wärmerückgewinnung wurde damals bereits so groß dimensioniert, dass auch die zusätzlichen 70 kW an Abwärme für die Hochtemperatur-Wärmepumpe über diesen hydraulischen Kreis ausgekoppelt werden kann, was eine relativ einfache wärmequellenseitige Einbindung der Hochtemperatur-Wärmepumpe in den Kaltwassersatz ermöglicht.

Um das verfügbare Abwärmepotential zur Gänze nutzen zu können, muss das Abwärmeangebot mit dem Bedarf an Nutzwärme im zeitlichen Einklang sein. Ein zusätzlicher Wärmespeicher könnte eine Diskrepanz zwischen Angebot und Nachfrage temporär ausgleichen, wäre aber mit zusätzlichen Investitionskosten verbunden. Deshalb sollte die benötigte Hochtemperatur-Wärmepumpe wärmesenkenseitig im Rücklauf des primären Kesselkreises der Heizzentrale (ca. 75°C), wo alle Abnehmer im Werk versorgt sind, im Wärmeversorgungsnetz integriert werden. Denn aufgrund des viel größeren Bedarfs an Heizleistung (durchschn. ca. 1,7 MW) im Verhältnis zur Heizleistung der Hochtemperatur-

---

<sup>1</sup> Der Großteil des Inhaltes dieses Kapitels basiert auf Zotter & Rieberer (2013a)

Wärmepumpe (ca. 100 kW) könnte diese auch ohne zusätzlichen Speicher integriert werden, da stets ein oder mehrere Abnehmer Bedarf haben.

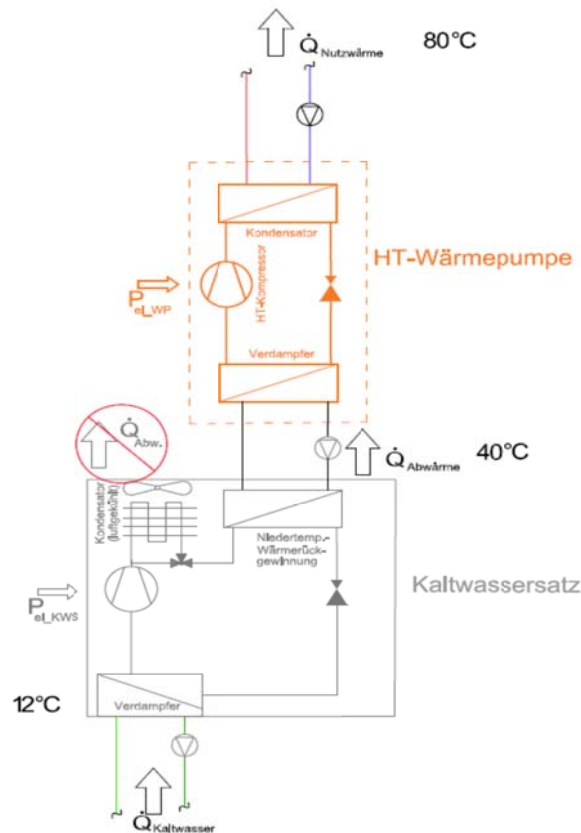


Abbildung 6: Prinzipielle Einbindung der Wärmepumpe in den bestehenden Kaltwassersatz

Basierend auf einer Auswertung der Maschinenstundenaufzeichnung des Kaltwassersatzes und der Schweißapparate vergangener Jahre wurde eine zu erwartende durchschn. Auslastung von ca. 4000 Vollaststunden pro Jahr für die Hochtemperatur-Wärmepumpe hochgerechnet.

### 3.1.2 Technische Analyse

Folgende Kriterien wurden zur Evaluierung von möglichen Wärmepumpensystemen und potentiellen Kältemitteln für die konkrete Anwendung herangezogen:

- Effizienz (Treibhausgasemissionen, Wirtschaftlichkeit)
- Umweltverträglichkeit & Toxizität des verwendeten Kältemittels (Sicherheitsauflagen)
- Drucklage des verw. Kältemittels (Kompressorbelastung)
- Volumetr. Kälteleistung des verw. Kältemittels (Anlagengröße)
- Regelkomplexität, Zuverlässigkeit, etc. (Betriebskomplexität)

Aufgrund der geringen wärmesenkenseitigen Temperaturspreizung (ca. 5 K) eignen sich im konkreten Fall folgende elektrisch angetriebene Wärmepumpenkreisläufe:

- Ein- und mehrstufige Kaltdampfkompressions-WPs
- Kompressions/Absorptions-WPs

Da, wie bereits erwähnt, der SPF aufwendig bestimmbar ist, wurde zur Effizienzbewertung der unterschiedlichen Wärmepumpen und Kältemitteln der COP aus Simulationen herangezogen. Die Modelle für die Simulation in EES (2010) basieren auf Massen- und Energiebilanzen, wobei der isentrope und der volumetrische Wirkungsgrad der Kompressoren (Annahmen des Verdichtungsverhältnisses) in Abhängigkeit des jeweiligen Druckverhältnisses abgebildet wurden. Zu beachten ist, dass der zu erwartende SPF kleiner sein dürfte, als der COP im Auslegungspunkt. Lt. der Simulation ist mit einem  $COP_{el,H}$  zwischen 3,8 bis 4,6, für eine Wärmesenken- von 80 °C und eine Wärmequellentemperatur von 40°C je nach System und Kältemittel zu rechnen.

Die Recherche nach einer geeigneten Wärmepumpe stellte sich als relativ aufwendig dar, da der Markt den Bedarf an Anlagen zu diesem Zeitpunkt für Nutztemperaturen von ca. 80°C und Heizleistungen von ca. 100 kW nur bedingt deckte. Maßgeschneiderte WPs lassen sich in dieser Leistungsklasse wirtschaftlich schwer darstellen. Es konnten trotzdem zwei prinzipiell geeignete Anlagen eines österr. Herstellers (Cofely, 2011) für diese Anwendung erhoben werden.

Unter Berücksichtigung aller o.a. Bewertungskriterien wurde die angebotene geschlossene Kompressions-Wärmepumpe mit R134a (Heizleistung von 100 kW) und einem  $COP_{el,H}$  von 3,8 präferiert. Entscheidend war dabei nicht die Effizienz, sondern die Einfachheit der Integration in den Kaltwassersatz und des Betriebs der Wärmepumpe.

### 3.1.3 Ökonomische Analyse

Für die wirtschaftliche Analyse wurden notwendige Rahmenbedingungen, wie Strom-, Gaspreise, Zinssätze etc. basierend auf den Vorgaben des Industriebetriebs verwendet. Zu den Anschaffungskosten der Wärmepumpe wurden Peripheriekosten für z.B. Planung und Installation, bauliche Aufwendungen, etc. im Ausmaß von 50% des Anschaffungspreises mitberücksichtigt, aber auch eine nationale Förderungen im Ausmaß von 30% auf die Gesamtinvestition (KPC, 2010). Keine Investitionskosten oder Abschreibungen wurden für den zum Vergleich herangezogenen bestehenden Gaskessel berücksichtigt, da dies keine Ersatzinvestition darstellt, sondern dieser als „Back-up“ im Betrieb weiter genutzt werden soll.

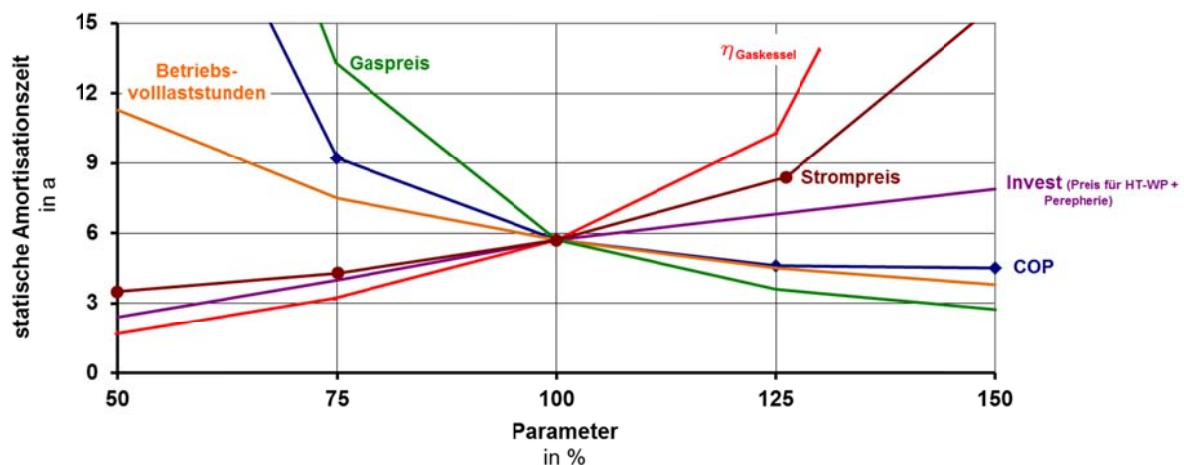
In Tabelle 1 sind die Basisdaten der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und deren Ergebnisse aufgelistet. Unter Berücksichtigung der Lebensdauer der Wärmepumpe von 15 Jahren und einem kalk. Zinssatz von 5% p.a, einer angenommenen Inflation von 3% p.a. und einer jährlichen Gas- bzw. Strompreissteigerung von 5 bzw. 3% p.a. ergibt sich eine dynamische Amortisationszeit von 6,8 Jahren.

Um den Einfluss einzelner Parameter zu quantifizieren, wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, da wirtschaftliche Betrachtungen im Energiesektor aufgrund der langfristig schwer einschätzbarer Entwicklung der Energiepreise etc. mit einer gewissen Unsicherheit verbunden sind. Abbildung 7 zeigt, dass der Gaspreis bei dieser Anwendung den größten Einfluss auf die statische Amortisationszeit (ohne Preissteigerungen, Inflation, etc.) der Wärmepumpe hat. Bei einem höheren Gaspreis als angenommen, würde sich die Anlage viel schneller amortisieren. Aber auch der COP, der Strompreis und die Auslastung haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit.



**Tabelle 1: Basisdaten und Ergebnisse der Amortisationsrechnung (Zotter & Rieberer, 2013a)**

Rahmenbedingungen	Wert für Analyse	Anmerkung
Volllaststunden	4000h/a	Basis aufgezeichnete Auslastung des Kaltwassersatzes der Wärmepumpe
Heizleistung	100 kW	
COP (SPF)	3,7	Herstellerangaben [13] (geringer als simulierter COP)
Strom- zu Gaspreis	2,4	lt. Industriebetrieb (Anm.: jedes Jahr neu verhandelt)
Investitionskosten	60 k€	WP + Peripherie (exkl. Förderung)
Förderung	30%	auf gesamte Investitionskosten der WP+ Peripherie
Zusätzliche Investitionen	10 k€	für nicht förderbare Projektierungskosten
$\eta_{\text{Gaskessel}}$	85%	lt. Industriebetrieb
Lebensdauer der WP	15 a	
Kalk. Zinssatz	5% p.a	lt. Industriebetrieb
Inflation	3% p.a.	abgestimmt mit Industriebetrieb
Strompreissteigerung	3 % p.a	abgestimmt mit Industriebetrieb
Gaspreissteigerung	5 % p.a	abgestimmt mit Industriebetrieb
Ergebnisse	Wert aus Analyse	Anmerkung
<b>Dyn. Amortisationszeit</b>	<b>6,8 a</b>	Inkl. Förderungen, ohne Investition f. Gaskessel (Back-Up)
<b>Stat. Amortisationszeit</b>	<b>5,7 a</b>	Inkl. Förderungen, ohne Investition f. Gaskessel (Back-Up)



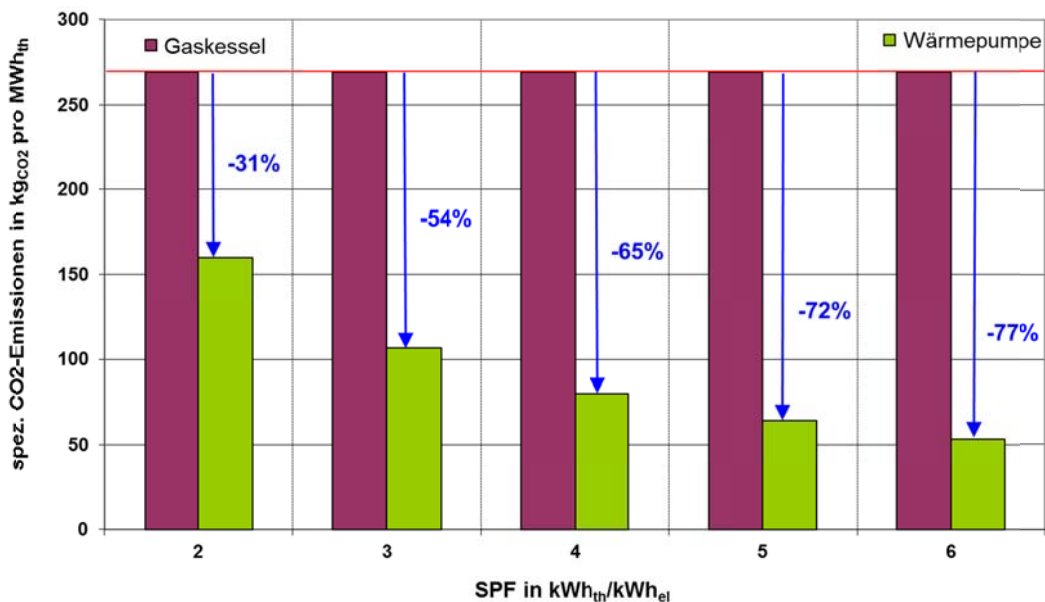
**Abbildung 7: Sensitivitätsanalyse - statische Amortisationszeit der Wärmepumpe bei veränderten Annahmen (Zotter & Rieberer, 2013a) (Basiswerte: siehe Tabelle 1 1)**

### 3.1.4 Ökologische Analyse

Hinsichtlich der ökologischen Relevanz könnten durch die Einbindung dieser Wärmepumpe im Industriebetrieb ca. 70 Tonnen an CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Jahr eingespart werden (siehe Tabelle 2). Dieser Wert hängt neben der Effizienz der Wärmepumpe auch vom standortspezifischen Emissionsfaktor für Strom ab. Abbildung 8 zeigt beispielhaft das mögliche CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential für die Wärmeversorgung durch eine elektrisch betriebene Wärmepumpe bei unterschiedlichen SPF im Vergleich zu einem gasbefeuerten Kessel.

**Tabelle 2: Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Reduktion pro Jahr durch die WP (Zotter & Rieberer, 2013a)**

Rahmenbedingungen	Wert für Analyse	Anmerkung
Volllaststunden	4000h/a	<i>basierend auf Aufzeichnungen der KWS-Auslastung</i>
Heizleistung	100 kW	<i>WP</i>
SPF (COP)	3,7	<i>Lt. Herstellerangaben (geringer als simulierter COP)</i>
Spez. Emissionsfaktor Strom	320 g CO <sub>2</sub> /kWh <sub>el</sub>	<i>für österr. Strommix (2011) lt. (KPC, 2011)</i>
Spez. Emissionsfaktor Gas	229 g CO <sub>2</sub> /kWh <sub>th</sub>	<i>für Erdgas (auf den Heizwert bezogen) lt. Biberacher</i>
$\eta_{\text{Gaskessel}}$	85%	<i>lt. Industriebetrieb</i>
Ergebnisse	Wert aus Analyse	Anmerkung
CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Jahr		
WP	86 g CO <sub>2</sub> /kWh <sub>th</sub>	<i>unter Berücksichtigung des SPF</i>
Gaskessel	269 g CO <sub>2</sub> /kWh <sub>th</sub>	<i>unter Berücksichtigung des <math>\eta_{\text{Gaskessel}}</math></i>
CO <sub>2</sub> -Einsparungen pro Jahr	ca. 70 t CO <sub>2</sub> /a	



**Abbildung 8: CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential bei der Wärmeversorgung mit elektr. angetriebener Wärmepumpe (bei 320 g CO<sub>2</sub> je kWh<sub>el</sub> lt. KPC (2011)) vs. konventioneller Gasfeuerung ( $\eta_{\text{Kessel}} = 85\%$ , 229 g CO<sub>2</sub> je kWh<sub>th</sub> des Heizwertes für Erdgas lt. Biberacher (2010)) in Abhängigkeit des SPF (vgl. Zotter & Rieberer, 2013a)**

### 3.1.5 Fazit

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Einbindungskonzept erarbeitet, bei dem sich eine Kompressionswärmepumpe zur innerbetrieblichen Nutzung von Abwärme für die Prozesswärmeversorgung trotz der relativ geringen Heizleistung (ca. 100 kW<sub>th</sub>) und des hohen Nutztemperaturniveaus (ca. 80°C) innerhalb von 7 Jahren amortisieren könnte. Weiters könnten ca. 180 kg an CO<sub>2</sub> pro MWh an gelieferter Heizwärme durch die Wärmepumpe im Vergleich zur konventionellen Feuerung eingespart werden. Die Entscheidung für/gegen die Realisierung der Wärmepumpe ist aus unterschiedlichen Gründen bis dato offen.

### 3.2 Thermisch angetriebene Wärmepumpe in einem Holz verarbeitenden Betrieb<sup>2</sup>

Beim Zellstoffproduzenten Schweighofer Fiber GmbH in Hallein dient ein Biomasseheizkraftwerk zur energetischen Verwertung von Reststoffen und Biomasse. Dabei hebt eine Absorptionswärmepumpe (AWP), welche von der Salzburg AG betrieben wird, das Temperaturniveau der Rauchgaskondensationswärme im Biomassekraftwerk von ca. 50°C auf 95°C an, um eine Nutzung dieser - ansonsten über den Schornstein abgeführten - Abwärme für die Fernwärmeversorgung zu ermöglichen. (Klima:aktiv, 2009)



Abbildung 9: Die Niederlassung der Schweighofer Fiber GmbH in Hallein (Schweighofer, 2013)

#### 3.2.1 Anlagenbeschreibung

Das Biomasseheizkraftwerk mit einer Leistung von 5 MW<sub>el</sub> und 30 MW<sub>th</sub> nutzt eine AWP zur Rauchgasabwärmerückgewinnung. Die AWP ermöglicht, wie bereits erwähnt, die Nutzung der Kondensationswärme des im Rauchgas enthaltenen Wasserdampfes für die Fernwärme, obwohl die Fernwärmerücklauftemperatur über der Taupunkttemperatur des Rauchgases liegt. Bei einer Verdampfungstemperatur der AWP unter dem Taupunkt des Rauchgases kondensiert das Wasser im Rauchgas aus. Die dabei freiwerdende Kondensationswärmeleistung im Rauchgas von ca. 3 MW<sub>th</sub> wird im Verdampfer der AWP bei ca. 50°C aufgenommen und durch die AWP auf ein für die Fernwärme nutzbares Temperaturniveau von ca. 95°C angehoben und über den Absorber und den Kondensator der einstufigen Wasser/Lithiumbromid-Anlage (mit Lösungsmittelwärmetauscher) abgegeben. Die nominelle Heizleistung der 2006 installierten AWP beträgt 7,5 MW. Als Antrieb der AWP (siehe Abbildung 10) dient Prozessdampf aus dem Biomassekraftwerk mit einem Temperaturniveau von ca. 165°C. Neben den 4 MW<sub>th</sub> an thermischer Antriebswärmeleistung benötigt die AWP noch ca. 20 kW<sub>el</sub> an elektrischer Antriebsleistung für die Lösungsmittelpumpe (Klima:aktiv, 2009, Laucher, 2009 und Bergthaller, 2013)

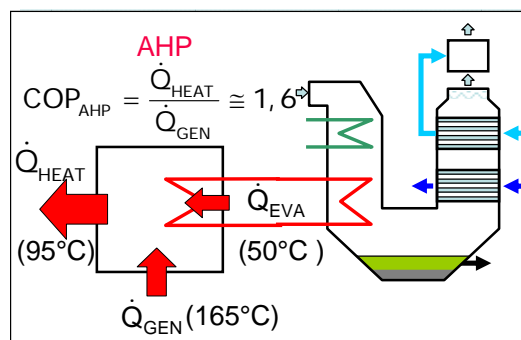


Abbildung 10: Prozessschema der Absorptionswärmepumpe im Biomassekraftwerk Hallein (Rechberger, 2012)

<sup>2</sup> Der Großteil des Inhaltes dieses Kapitels basiert auf Rieberer et al. (2014)

### 3.2.2 Energetische, Ökonomische und Ökologische Bewertung

Lt. dem Betreiber (Bergthaller, 2013) arbeitet die AWP gemäß dem existierenden Monitoringsystem mit einer Jahresarbeitszahl ( $SPF_{th,H}$ ) von 1,6. Durch die zusätzliche Nutzung der Rauchgaskondensationswärme kann jährlich ca. 16.000 MWh an Brennstoffenergie und damit bis zu 6.000 Tonnen an  $CO_2$  pro Jahr bzw. 140 kg an  $CO_2$  pro MWh an gelieferte Heizwärme eingespart werden (Bergthaller, 2013). Aufgrund der hohen Auslastung der AWP von ca. 6.200 Volllaststunden im Jahr, weist diese Anlage aus Sicht des Betreibers (Bergthaller, 2013) ein hohes wirtschaftliches Potential auf. Denn neben der Brennstoffersparnis entfallen lt. Laucher (2009) auch Kosten für die Rauchgasentschwadung, die Brennstofflagerung und –manipulation.

### 3.2.3 Fazit

Diese Anwendung einer Absorptionswärmepumpe in einem Biomasseheizkraftwerk ermöglicht die Rauchgaskondensationswärme auch für Temperaturniveaus über dem Taupunkt nutzen zu können, und damit nicht nur  $CO_2$ -Emissionen und Brennstoffkosten, sondern auch z.B. Kosten für die Entschwadung einzusparen.

## 4 Conclusio

Die in dieser Arbeit vorgestellten Anwendungen verdeutlichen das ökologische Potential der innerbetrieblichen Abwärmenutzung mittels Wärmepumpen für die Industrie, da ca. 60% bzw. 40% der  $CO_2$ -Emissionen der gelieferten Heizwärme im Vergleich zu den konventionellen Wärmeversorgungssystemen eingespart werden könnte bzw. bereits wird.

Generell gibt es eine Vielzahl von möglichen Anwendungen, bei denen die Wärmeversorgung in der Produktion (zum Teil) durch Wärmepumpen gedeckt werden könnte. Trotz der o.a. Vorteile gibt es bis dato nur sehr wenige Wärmepumpenanwendungen zur industriellen Abwärmenutzung in Österreich. Denn die geforderten Temperaturniveaus liegen meist deutlich über denen von konventionellen Heizungs- oder Brauchwasseranwendungen, weshalb i.d.R. spezielle Hochtemperatur-Wärmepumpen erforderlich sind. Leider deckt der Markt den Bedarf an geeigneten Wärmepumpen nur bedingt und wenn, handelt es sich dabei meist um maßgeschneiderte und damit kostenintensive Anlagen. Weiters sind auch die von der Industrie geforderten (sehr) kurzen Amortisationszeiten und fehlende Erfahrung mit bereits realisierten Anlagen als aktuelle Marktbarriere zu nennen.

Die Disseminierung der Erkenntnisse von „Best-Practise-Bsp.“ auch aus anderen Ländern wird potentielle Anwendungen für die heimische Industrie aufzeigen und damit den nötigen Anstoß für eine größere Verbreitung von industriellen Wärmepumpen in Österreich geben. Denn die innerbetriebliche Abwärmenutzung mittels Wärmepumpen bietet einerseits die Möglichkeit einer signifikanten Reduktion von  $CO_2$ -Emissionen in einem ökologisch-relevanten Sektor und andererseits einen neuen Markt für die Wärmepumpenbranche. Ein weltweit steigender Trend von Forschungs- und Entwicklungsarbeit bezüglich der Thematik „Hochtemperatur-Wärmepumpe“ (z.B. Haixia, et al., 2011, Shengjun et al., 2010 oder Fukuda et al., 2013) unterstreicht die Relevanz der Nutzung von industrieller Abwärme mittels Wärmepumpen für beide, die Industrie und die Wärmepumpenbranche.

## 5 Danksagung

**Diese Veröffentlichung wurde durch die Beteiligung am IEA HPP ANNEX 35 „Application of Industrial Heat Pumps“ ermöglicht, welche durch das BMVIT Austria im Rahmen der IEA-Beteiligung finanziell gefördert wurde (FFG-Nr.: 824966 & 839570) und im Rahmen der Forschungs Kooperation Internationale Energieagentur durchgeführt.**



## 6 Quellen

- Bergthaller, 2013: Data sheets about the absorption heat pump located at the biomass plant in Hallein – from Salzburg AG via email (26.03.2013) (nicht veröffentlicht)
- Biberacher, Gadocha, Schardinger, Zoher, Dröscher, Heimrath, Schranzhofer, Bärnthaler, Puchas, Niederl, Jilek, Dorner, 2010: Räumliche Modelle als Entscheidungsgrundlage für die Inwertsetzung regional verfügbarer Energiepotenziale zur CO<sub>2</sub>-neutralen Deckung des lokalen Wärmebedarfs - Endbericht (FFG-Nr.: 814139), Research Studios Austria Forschungsgesellschaft mbH 2. Ausschreibung der Programmlinie Energiesysteme der Zukunft, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie – Österreich, Salzburg, 2010
- Cofely, 2011: Angebot der Fa, Cofely (PNr.: 11-118872) vom 12.09.2011
- EES, 2011: Engineering Equation Solver. Academic Professional V8; F-Chart Software.
- Fukuda, Kondou, Takata, Koyama, 2013: Low GWP refrigerants R1234ze(E) and R1234ze(Z) for high temperature heat pumps, International Journal of Refrigeration, Available online 7 November 2013, ISSN 0140-7007
- Haixia, Guoyuan, Xin, Shuxue, 2011: Thermodynamic analysis of moderate high temperature heat pump system using water as working fluid, 10<sup>th</sup> IEA Heat Pump Conference 2011 Proceedings, Tokyo
- IEA HPP, 2010: Application of Industrial Heat Pumps – Legal Text; IEA Heat Pump Programme Annex 35 & IEA Industrial Energy Systems and Technologies Annex 13
- Jakobs, 2010: Status und Ausblick - Wärmepumpen für Gewerbe, Prozess- und Industriekälte. Hamburg : Netzwerk Kälteeffizienz, 2010.
- Klima:aktiv, 2009: Eckdaten zur Biomassekraftwerksanlage in Hallein, Klima:aktiv – qm heizwerke; <http://www.qm-heizwerke.at/documents/Nachlese/SalzburgHallein2009/Info%20Biomasseheizkraftwerk%20Hallein%20%C3%9Cbersicht.pdf> (07.07.2013)
- KPC, 2011: Kommunalkredit Public Consulting. <http://www.publicconsulting.at/> - Telefonat mit Frau Preisegger am 12.10.2011
- Lambauer, Fahl, Ohi, Blesl, Voß, 2008: Industrielle Großwärmepumpen - Potenziale, Hemmnisse und Best-Practice Beispiele – Endbericht des *Forschungsprojekt* gefördert von der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg, Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung in Kooperation mit Ochsner Wärmepumpen GmbH, Stuttgart 2008
- Laucher, 2009: Grundlagen für den Wärmepumpeneinsatz - Abwärmenutzung, Biomasseanlagen mit Kondensation"; Amt der Salzburger Landesregierung; <http://www.qm-heizwerke.at/documents/Nachlese/SalzburgHallein2009/Vortrag%20Laucher%20Planerschulung%202009%20Gesamt.pdf> (07.07.2013)
- Moser, Zotter, Rieberer, 2011: „HyPump“- Hocheffiziente Hybrid-Wärmepumpe zur Wärmerückgewinnung in der Industrie - research proposal for the R&D project HyPump for KliEn – EE 2020 (5th call) processed by the Austrian Funding Agency “FFG” (Project-Nr. 834614) – Institute of Thermal Engineering at Graz University of Technology, Austrian Institute of Technology and Frigopol, Graz 2011 (nicht öffentlich)

- Nortvedt, 2005: Experimental and theoretical study of a compression/absorption heat pump with ammonia/water as working fluid –Doctoral Theses at NTNU 2005:82, Norwegian University of Science and Technology
- Rechberger, 2012: Wärmerückgewinnung mittels Rauchgaskondensationsanlagen bei biomassebefeuerten Heizkraftwerken; Diplomarbeit am Institut für Wärmetechnik der TU Graz
- Rieberer, Zotter, Moser, Malenkovic, 2011a: IEA HPP, IETS Annex 13 / 35 - Application of Industrial Heat Pumps, Austrian Team Report: Task 1 – Part 1
- Rieberer, Zotter, Moser, Malenkovic, 2011b: IEA HPP, IETS Annex 13 / 35 - Application of Industrial Heat Pumps, Austrian Team Report: Task 1 – Part 2
- Rieberer, Zotter, Fleckl, Zottl, 2014: IEA HPP Annex 35 – Applications of Industrial Heat Pumps, Nationaler Endbericht zu den österr. Teilnahmen (FFG-Nr.: 824966 & 839570) (voraussichtliche Veröffentlichung 2014 durch das BMVIT)
- Schweighofer, 2013: <http://www.schweighofer-fibre.at/de/> (02.10.2013)
- Shengjun, Huaixin, Tao, 2010: Experimental investigation of moderately high temperature water source heat pump with non-azeotropic refrigerant mixtures, Applied Energy, Volume 87, Issue 5, May 2010, Pages 1554-1561, ISSN 0306-2619
- Statistik Austria, 2010: AUSTRIA-Data-Figures-Facts 10/11, 6th edition, *Statistics Austria - Federal Institution under Public Law*, Vienna 2010, ISBN 978-3- 902703-66-8
- Vehovec, Zotter, Rieberer, Mauthner, Brunner, 2013: Promise Demo IF – Industrielle Forschung für PROMISE DEMO (Produzieren mit Solarer Energie – Demonstrations-projekt), Endbericht (FFG-Nr.: 82553), *NEUE ENERGIEN 2020*, Klima- und Energiefond, Wien
- Zotter & Rieberer, 2010: Application of Industrial Heat Pumps – Planned Activities at the Institute of Thermal Engineering TU Graz, Kick-off Meeting, *IEA HPP Annex Industrial Heat Pumps*, Maintal (GER), 2009-04-07
- Zotter & Rieberer, 2013a: Technische, ökologische und ökonomische Analyse des Einsatzes einer Wärmepumpe zur Nutzung von industrieller Abwärme in einem metallverarbeitenden Betrieb, im Deutsche Kälte-Klima-Tagungsband (2013), Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein (2013), Proceeding-Paper, S.1-19
- Zotter & Rieberer, 2013b: Technische, ökologische und ökonomische Analyse des Einsatzes einer Wärmepumpe zur Nutzung von industrieller Abwärme in einem metallverarbeitenden Betrieb, Präsentation zur DKV-Tagung 2013, in Hannover, am 22.11.2013