

MÖGLICHKEITEN ZUR EFFIZIENZSTEIGERUNG IN INDUSTRIEPROZESSEN MIT ABSORPTIONSWÄRMEPUMPEN

Elena Steinwender(*)¹, Michael Wernhart¹, René Rieberer¹, Marlene Kienberger², Christoph Weinzettl², Markus Damm³

¹TU Graz - Institut für Wärmetechnik, Inffeldgasse 25/B, A-8010 Graz, +43 316 873 7801, +43 316 873 7302, elena.steinwender@tugraz.at, www.iwt.tugraz.at

²TU Graz – Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, Inffeldgasse 25/C, A-8010 Graz, +43 316 873 7484, www.ceet.tugraz.at

³proionic GmbH, Parkring 18/H, A-8074 Raaba-Grambach, +43 664 88933943, m.damm@arkema.com, www.proionic.com

Kurzfassung: Die Dekarbonisierung industrieller Wärmesysteme und Fernwärmenetze erfordert Technologien, die eine zusätzliche Belastung der Stromnetze vermeiden und gleichzeitig eine effiziente Nutzung vorhandener Abwärmequellen ermöglichen. Absorptionswärmepumpen (AWPs) stellen hierfür eine vielversprechende Möglichkeit dar, da sie hauptsächlich thermische Antriebsenergie nutzen und einen vernachlässigbaren elektrischen Energiebedarf aufweisen. In diesem Beitrag wird anhand zweier ausgewählter Anwendungsfälle, die Ziegelrocknung sowie die Einbindung einer AWP in Fernwärmesysteme, kurz erläutert, wie AWPs Niedertemperaturabwärme auf nutzbare Temperaturniveaus anheben können und eine Möglichkeit zur Kältebereitstellung im Sommerbetrieb diskutiert. Dieser Beitrag geht dabei auf bereits existierende Einbindungen von AWPs in den genannten Industriebereichen und den damit einhergehenden Einsparungen von fossilen Brennstoffen und Emissionen ein. Zudem wird die Limitierung aktuell genutzter Sorptionsmittel beschrieben und potentielle Alternativen angeführt.

Keywords: Absorptionswärmepumpe, Ionische Flüssigkeiten, Stark eutektische Lösungsmittel, Lithiumbromid, industrielle Einbindung, Fernwärme, Ziegelrocknung

1 Einleitung

Die europäische Energie- und Klimapolitik setzt zur Dekarbonisierung des Energiesystems stark auf eine umfassende Elektrifizierung von Industrie-, Gebäude- und Verkehrssektoren. Durch diese Entwicklung wird der zukünftige Strombedarf und damit die Belastung der elektrischen Netzinfrastruktur weiter steigen. (Europäische Kommission, 2025)

Auf Basis dieses Hintergrundes stellen Absorptionswärmepumpen eine Option dar, da sie die Nutzung von industrieller Abwärme ermöglichen, um Wärme oder Kälte bereitzustellen und durch ihren geringen Strombedarf eine Entlastung der Stromnetze. (Ayou et al., 2025)

Für deren Betrieb wird zur Überwindung des Druckunterschieds zwischen Hoch- und Niederdruck anstelle eines mechanischen Verdichters ein sogenannter thermischer Verdichter eingesetzt. In diesem findet ein „Kraftprozess“ statt, der zwischen Absorber und Generator abläuft und durch Wärmezufuhr angetrieben wird. Hierbei wird das Kältemittel, meist Wasser, unter geeigneten Temperatur- und Druckbedingungen in einem Sorptionsmittel,

typischerweise Lithiumbromid, gelöst und nach Überwindung des Druckunterschieds wieder ausgetrieben. Durch dieses Funktionsprinzip ist der elektrische Leistungsbedarf von AWP's im Vergleich zu Kompressionswärmepumpen vernachlässigbar, stattdessen ist ein Wärmestrom auf hohem Temperaturniveau als Antriebsenergie erforderlich. (Herold et al., 2016)

1.1 Systembeschreibung

Abbildung 1 zeigt eine vereinfachte, schematische Darstellung des Kreislaufs einer Absorptionswärmepumpe, bestehend aus dem linksläufigen Kältemittelkreislauf und dem rechtsläufigen Kraftprozess.

Die reiche Lösung (RSo) mit einem hohen Kältemittelanteil wird durch die Lösungspumpe (SP) vom Niederdruck (p_l) auf den Hochdruck (p_h) gefördert. Anschließend durchströmt sie den internen Lösungswärmeübertrager (SHX), in dem sie Wärme von der armen Lösung aufnimmt, bevor sie in den Generator (Gen) eintritt. Durch die Zufuhr der Antriebswärme (\dot{Q}_{Gen}), die in industriellen Anwendungen vorzugsweise aus einer Hochtemperatur-Abwärmequelle stammt, wird das Kältemittel aus der reichen Lösung ausgetrieben, im Generator verbleibt eine kältemittelarme Lösung.

Der im Generator freigesetzte Kältemitteldampf strömt anschließend in den Kondensator (Con), wo er unter Abgabe von Kondensationswärme (\dot{Q}_{Con}) verflüssigt wird. Das flüssige Kältemittel wird danach in der Kältemitteldrossel (RTh) auf Niederdruck entspannt und strömt in den Verdampfer (Eva). Dort verdampft das Kältemittel unter Aufnahme der Kälteleistung \dot{Q}_{Eva} , die z.B. aus einer Niedertemperatur-Abwärmequelle stammt.

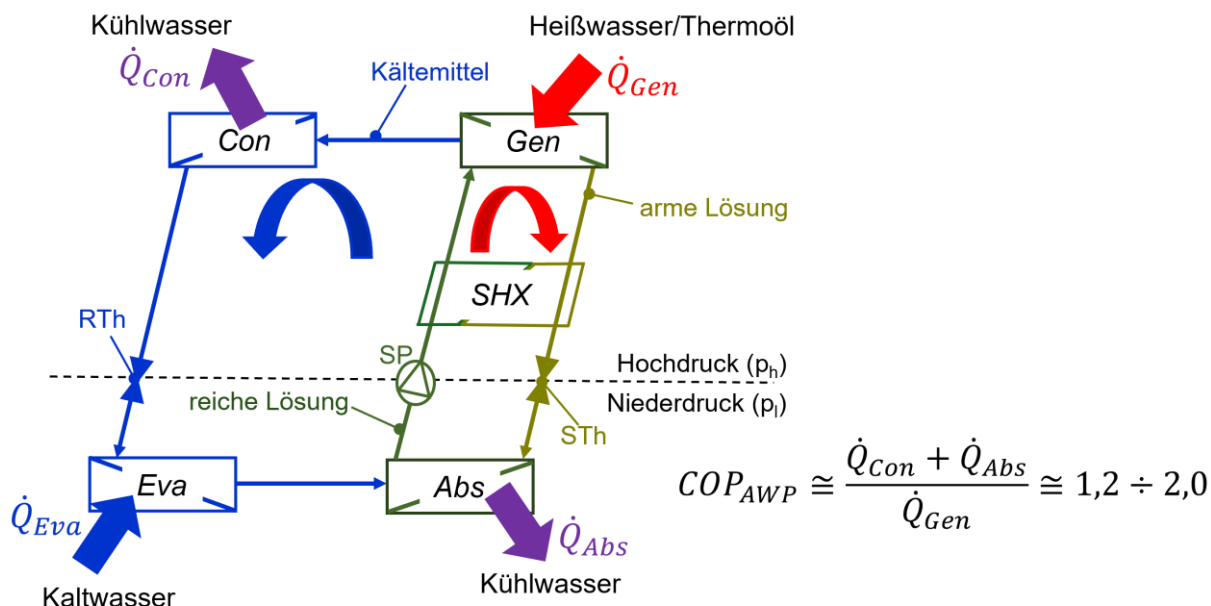


Abbildung 1: Vereinfachte schematische Darstellung des Kreislaufs einer Absorptionswärmepumpe mit Kältemittelkreislauf und thermischem Verdichter, bestehend aus Verdampfer (Eva), Absorber (Abs), Lösungspumpe (SP), Lösungswärmeübertrager (SHX), Generator (Gen), Lösungsdrossel (STh), Kondensator (Con) und Kältemitteldrossel (RTh) (in Anlehnung an Wernhart et al., 2020) inkl. Definition des COP

Der im Verdampfer erzeugte Kältemitteldampf wird im Absorber (Abs) von der armen Lösung (PSo) aufgenommen, welche zuvor Wärme an die reiche Lösung abgegeben hat und anschließend über die Lösungsdrossel (STh) in den Absorber zurückgeströmt ist. Beim

Absorptionsprozess wird die Absorptionswärme \dot{Q}_{Abs} frei, die – neben der Kondensationswärme – auf mittlerem Temperaturniveau genützt werden kann.

In kommerziell genutzten AWP's wird in erster Linie das Arbeitsstoffpaar Wasser/Lithiumbromid ($H_2O/LiBr$) genutzt, wobei Wasser als Kälte- und Lithiumbromid als Absorptionsmittel dient. Dieses weist spezifische betriebliche und wirtschaftliche Herausforderungen auf, wie Korrosion und Kristallisation. (Ji et al., 2023)

2 Industriespezifische Anwendungen

In industriellen Anwendungen ist die Antriebswärme \dot{Q}_{Gen} beispielsweise in Form von günstigem Prozessdampf verfügbar. Für AWP's, die das Arbeitsstoffpaar $H_2O/LiBr$ nützen, liegen typische Antriebstemperaturen im Bereich von etwa 80 – 150 °C (Rieberer, 2015), während Nutzwärme auf Temperaturen von ca. 70 - 90 °C (je nach Anwendung) bereitgestellt werden kann (Herold et al., 2016).

Industrielle Prozesse, in denen große Mengen ungenutzter Abwärme anfallen bzw. Absorptionswärmepumpen zum (un)mittelbaren Ersatz fossiler Brennstoffe sinnvoll eingesetzt werden können sind beispielsweise:

- die Ziegelindustrie, wo beim Brennprozess hohe Abgastemperaturen entstehen (AIT, 2025)
- Fernwärmenetze in denen Rauchgaskondensation mittels AWP (SOLID, n.d.) bzw. im Sommer nicht abgenommene Wärme zur Kältebereitstellung genützt wird

2.1 Absorptionswärmepumpen in der Ziegelindustrie

Die Ziegelproduktion umfasst mehrere Prozessschritte, beginnend mit der Aufbereitung der Rohstoffe und der Formgebung der sogenannten Grünlinge, gefolgt von deren Trocknung, dem Brennen im Tunnelofen, sowie die abschließende Abkühlung der fertigen Ziegel. Diese Prozesskette benötigt große Mengen thermischer Energie und geht mit mehreren Abwärmeströmen auf unterschiedlichen Temperaturniveaus einher. (Rötzer, 2025)

Wie in Abbildung 2 ersichtlich wird die AWP thermisch durch die Hochtemperaturabwärme aus dem Ofenabgas mit Temperaturen im Bereich von etwa 130 – 150 °C angetrieben (Delpech et al., 2017). Diese wird dem Generator zugeführt und das Kältemittel dadurch aus der Lösung ausgetrieben (Herold et al., 2016). Absorber und Kondensator heben die zurückgewonnene Niedertemperaturwärme von 55 °C auf 94 °C an. Diese Wärmemenge wird in erster Linie für den Trocknungsprozess der Grünlinge genutzt, wodurch die Wärmeversorgung auf Basis fossiler Brennstoffe reduziert werden kann (European Commission, 2007).

Die warme feuchte Abluft aus dem Trocknungsprozess kann über einen zusätzlichen Kondensationswärmeübertrager geführt werden (European Commission, 2007). Der hohe Feuchtigkeitsgehalt der Luft (60 % rF = relative Feuchte) ermöglicht bei Abkühlung unter den Taupunkt sowohl die Rückführung der sensiblen wie auch der latenten Wärme und durch die Versorgung des Verdampfers die Integration der AWP.

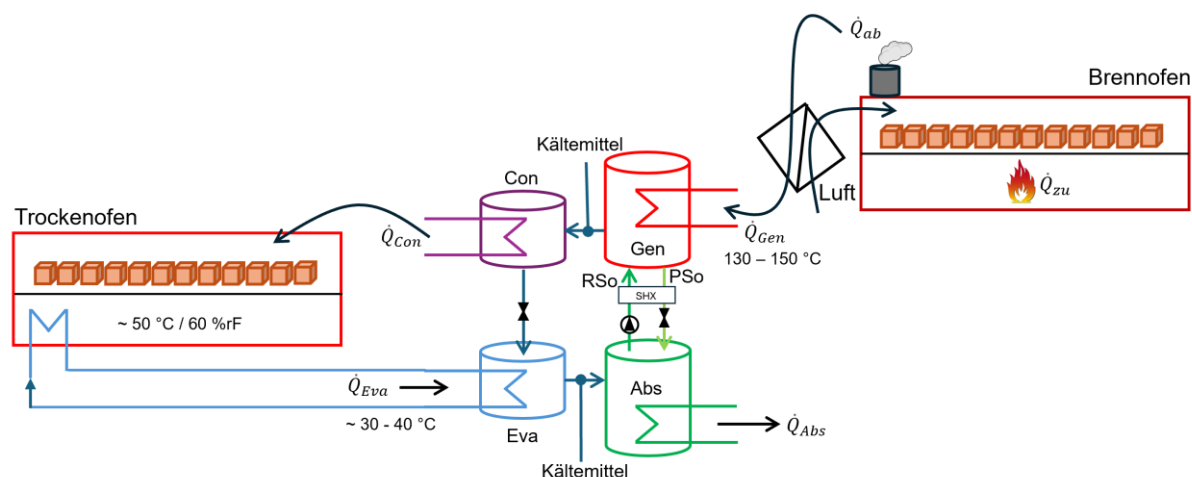


Abbildung 2: Beispielhaftes Schema zur Einbindung einer Absorptionswärmepumpe in den Ziegel Trocknungsprozess mit Größenordnungen der Wärmestromtemperaturen. Die Brennofenwärme wird genutzt, um die AWP anzutreiben, die abgebenen Wärmemenge kann zur Trocknung der Grünlinge verwendet werden. rF = relative Feuchte

2.2 Absorptionswärmepumpen in Fernwärmenetzen

Bei der Verbrennung von Biomasse, Abfällen oder Erdgas sowie bei der Nutzung industrieller Abwärme im Fernwärmenetz enthalten die Rauchgase neben sensibler Wärme erhebliche Mengen an Wasserdampf mit gespeicherter latenter Wärme, die üblicherweise ungenutzt über den Kamin abgeführt wird. Eine Möglichkeit zur Rückgewinnung dieser Energie stellt die mehrstufige Rauchgaskondensation mit Niedertemperatur-Economizer (ECO) und optionaler Entschwadungsanlage dar, die zur Vermeidung sichtbarer Dampfschwaden bei niedrigen Umgebungstemperaturen eingesetzt wird. (Rechberger, 2009)

In Abbildung 3 ist der schematische Aufbau der Anlage dargestellt. Das bei Biomassefeuerung bis zu 180 °C heiße Rauchgas wird im Niedertemperatur-Economizer bis knapp oberhalb des Wasserdampftaupunkts abgekühlt, wobei sensible Wärme prozessintern genutzt wird. Zur Vermeidung von Austrocknung und Korrosion wird der Wärmeübertrager über einen Quench bedarfsabhängig mit Kondensatwasser befeuchtet. Im nachgeschalteten Kondensator wird die latente Wärme des Rauchgases zurückgewonnen (i.e. Rauchgas wird kondensiert) und als Niedertemperatur-Wärmequelle in der Absorptionswärmepumpe genutzt. Anschließend wird die Verbrennungsluft in Kreuzstromwärmetauschern vorgewärmt und mit Umgebungsluft vermischt, um sichtbare Wasserdampfschwaden vor dem Kamin zu vermeiden. Das anfallende Kondensat wird neutralisiert, Kondensatschlamm separat entsorgt. (Rechberger, 2009)

Die Wärmequellentemperatur am Verdampfeintritt liegt dabei in etwa bei 50 °C. Die freiwerdende Wärme im Absorber und Kondensator der AWP kann mit ca. 95 °C dem Fernwärmevorlauf hinzugefügt werden.

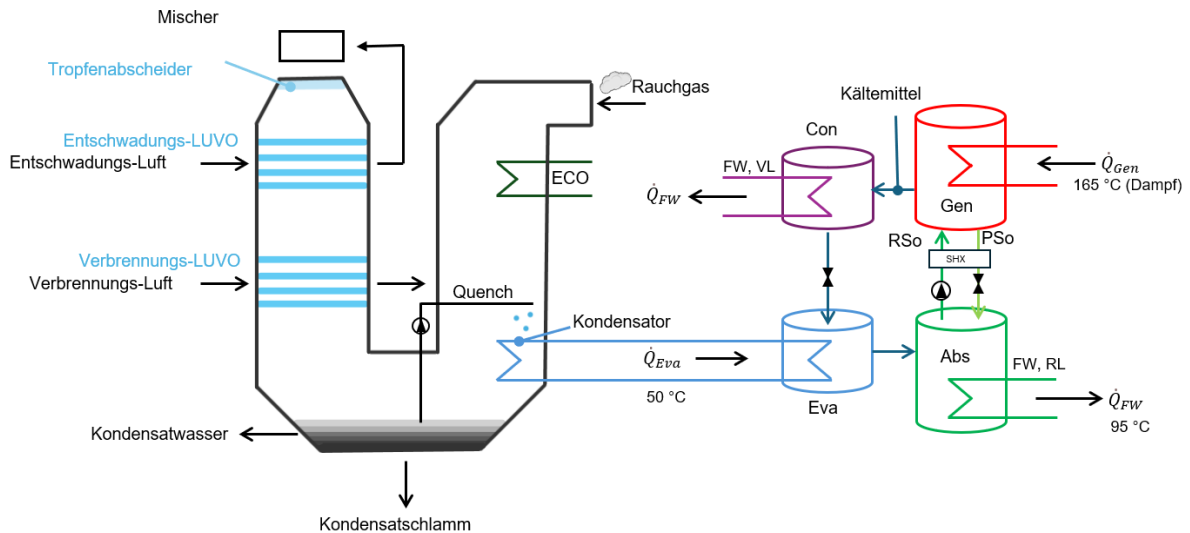


Abbildung 3: Vereinfachtes Schema einer Absorptionswärmepumpe inkl. Rauchgaskondensationsanlage im Heizbetrieb in Anlehnung an Rechberger (2009). Das Rauchgas tritt in die Anlage ein, durchläuft Economizer (ECO) und Kondensator; nicht-kondensierte Anteile verlassen die Anlage über den Verbrennungs- und Entschwadungs-Luftvorwärmer (LUVO)

Im Winterhalbjahr besteht eine hohe Wärmenachfrage, im Sommer tritt häufig ein strukturelles Ungleichgewicht auf: Fernwärmenetze sind gering ausgelastet, während industrielle Anlagen (z.B. Müllverbrennung) weiterhin Wärme erzeugen. Diese kann zur Kälteerzeugung genutzt werden, wobei Absorptionswärmepumpen (AWP) die Wärme als Antriebsenergie einsetzen. Typische Antriebstemperaturen liegen zwischen 70 - 120 °C, sodass die erfolgreiche Integration von der im Sommer verfügbaren Vorlauftemperatur des Fernwärmenetzes abhängt (Rieberer, 2025). Die so erzeugte Kälte kann über Fernkältenetze für Gebäudekühlung, Krankenhäuser, Rechenzentren oder industrielle Anwendungen genutzt werden und erhöht zugleich die Jahresauslastung von Fernwärmeerzeugern bei gleichzeitiger Reduktion stromintensiver Klimatisierungslösungen.

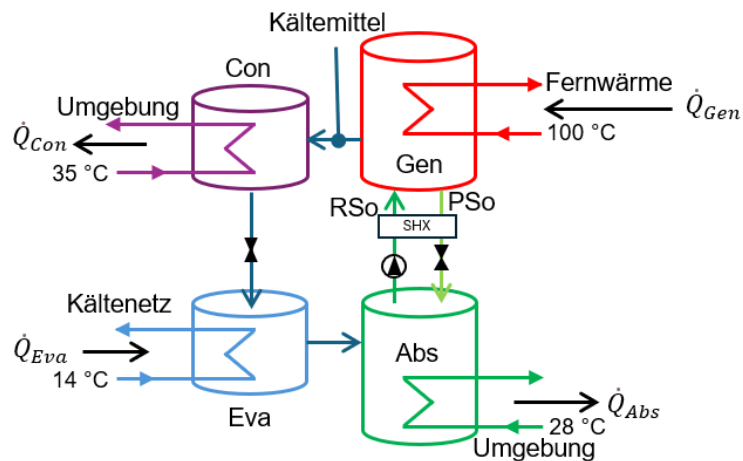


Abbildung 4: Vereinfachtes Schema einer Absorptionswärmepumpe im Kühlbetrieb in Anlehnung an Herold et al. (2016) mit Beispielen zu den Wärmestromtemperaturen

3 Arbeitsstoffe

Um einen effizienten und betriebssicheren Anlagenbetrieb von Absorptionswärmepumpen zu gewährleisten, müssen die eingesetzten Arbeitsstoffpaare (bestehend aus Kältemittel und Sorptionsmittel) laut Xu et al. (2017) nachfolgende Eigenschaften aufweisen:

- Kältemittel mit hoher latenter Verdampfungswärme → kleine Kältemittelmassenströme
- gute Wärme- und Stoffübertragungseigenschaften im relevanten Temperaturbereich → hohe spezifische Leistungsdichten im thermischen Verdichter und effizienter Betrieb
- ungiftig, nicht korrosiv, nicht brennbar, chemisch stabil und umweltfreundlich

Laut Ji et al. (2023) existiert bislang kein Arbeitsstoffpaar, das alle thermodynamischen, sicherheitstechnischen und ökologischen Anforderungen vollständig erfüllt. Das aktuell als Standard genutzte Arbeitsstoffpaar ist H₂O/LiBr (für tiefe Verdampfungstemperaturen teilweise NH₃/H₂O). Alternative Sorptionsmittel sind Ionische Flüssigkeiten (ILs) und Stark eutektische Lösungsmittel (DES), die im Rahmen vom laufenden Forschungsprojekt AbSorbEnt untersucht werden und die LiBr vor allem in den Anwendungen ersetzen sollen, für die es aufgrund der nachfolgend beschriebenen Eigenschaften ungeeignet ist.

3.1 H₂O/LiBr

Der Einsatz des etablierten Arbeitsstoffpaares H₂O/LiBr ist mit mehreren betrieblichen Herausforderungen verbunden. Wässrige Lithiumbromidlösungen wirken stark korrosiv auf metallische Komponenten, weshalb der Zusatz von Korrosionsinhibitoren erforderlich ist. Prinzipiell führen Korrosionsprozesse zur Bildung von Inertgasen, die kontinuierlich aus dem System entfernt werden müssen, da sie andernfalls die Wärme- und Stoffübertragung und damit die Anlagenleistung und -effizienz beeinträchtigen.

Eine weitere zentrale Herausforderung ergibt sich aus dem Kristallisationsverhalten von LiBr. Da LiBr als festes Salz nur in gelöster Form im Lösungskreislauf zirkulieren kann, übernimmt Wasser im Absorptionssystem eine „Doppelfunktion“ als Kälte- und Lösungsmittel. Der LiBr-Massenanteil ist daher unmittelbar an die im Generator ausgetriebene Wassermenge gekoppelt. Wird zu viel Wasser aus der Lösung entfernt, kann es zur Übersättigung und damit zur Kristallisation kommen. Diese beeinträchtigt nicht nur die Effizienz des Absorptionsprozesses, sondern kann bei wiederholtem oder starkem Auftreten bis zum vollständigen Systemstillstand führen. (Herold et al., 2016)

Abbildung 5 zeigt eine H₂O/LiBr-Absorptionsanlage im Kühlbetrieb im log(p)/T-Diagramm. Die Linien konstanten Lösungsmittelmassanteils x ergeben sich dabei aus der logarithmierten Dampfdruckbeziehung $\ln(p(T,x))$ der gesättigten, flüssigen Lösung (aufgrund fehlender Daten für [EMIM][MeSO₃] in Abbildung 6 Darstellung im Kühl- und nicht im Heizbetrieb). Der hier eingezeichnete Prozesszustand basiert nicht unmittelbar auf den vorgegebenen Temperaturen der externen Wärmequellen und -senke, sondern auf den tatsächlichen Temperaturen des Arbeitsstoffpaares, die sich infolge endlicher Wärmeübergänge ergeben:

- Hochtemperatur-Wärmequelle $t_{Quelle, hoch, ein} = 100 \text{ °C}$:
 - $\Delta T = -9 \text{ K} \rightarrow t_{PSo, Gen, sat} = 91 \text{ °C}$... Lösungstemperatur am Generatöraustritt
- Wärmesenke $t_{Senke, ein} = 28 \text{ °C}$:

- $\Delta T = + 5 \text{ K} \ \& \ + 5 \text{ K}$ Unterkühlung $\rightarrow t_{R_{So,Abs,out}} = 38 \text{ }^\circ\text{C}$... Lösungstemperatur am Absorberaustritt
- $\Delta T = + 5 \text{ K} \rightarrow t_{Ref,Con} = 33 \text{ }^\circ\text{C}$... Kondensationstemperatur
- Niedertemperatur-Wärmequelle $t_{Quelle,niedrig,aus} = 14 \text{ }^\circ\text{C}$:
 - $\Delta T = - 3 \text{ K} \rightarrow t_{Ref,Eva} = 11 \text{ }^\circ\text{C}$... Verdampfungstemperatur

Im Generator befinden sich der austretende Wasserdampf und die konzentrierte LiBr-Lösung im Gleichgewicht. Entsprechend wird im Diagramm für beide Stoffströme dieselbe Temperatur angesetzt ($t_{R_{So,Gen,sat}}$). Im Verdampfer ($t_{Ref,Eva,sat}$) wird berücksichtigt, dass die Verdampfung des Wassers bei einer Temperatur erfolgt, die um etwa 3 K unterhalb der Niedertemperatur-Wärmequellentemperatur liegt. Diese Temperaturdifferenz stellt die treibende Kraft für den Wärmeübergang dar und bestimmt den im Diagramm eingezeichneten Niederdruck p_l . Die Kondensationstemperatur bestimmt den Hochdruck p_h . Im Absorber ($t_{R_{So,Abs,out}}$) wird die Absorption des Wasserdampfs in die LiBr-Lösung dargestellt. Die Lösungstemperatur liegt hierbei um etwa 5 K oberhalb der Temperatur der Wärmesenke, um die Abfuhr der Absorptionswärme zu ermöglichen. Zusätzlich wird eine Unterkühlung der Lösung um etwa 5 K gegenüber der Gleichgewichtstemperatur angenommen. Insgesamt ergibt sich somit die im Diagramm dargestellte Absorbentemperatur ($t_{R_{So,Abs,out}}$) von etwa 10 K über der Wärmesenkentemperatur.

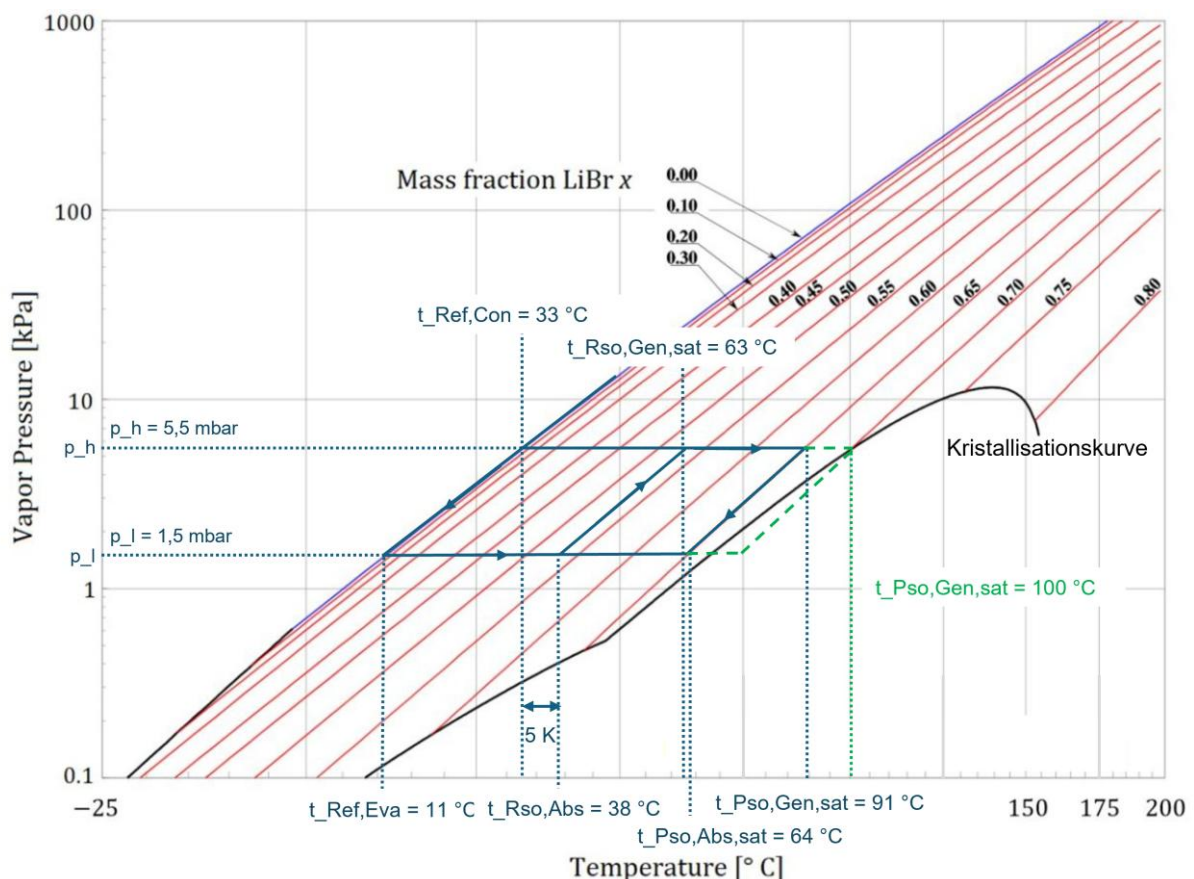


Abbildung 5: Dampfdruck-Temperatur-Diagramm von wässriger LiBr-Lösung mit Markierung der relevanten Temperaturen, Drücke und zwei beispielhaften Kreisprozessen des Arbeitsstoffpaares im Kühlbetrieb. Der „sichere Betrieb“ ist in blau mit durchgängiger Linie dargestellt, der „unsichere“, der die Kristallisationskurve (schwarz) schneidet, in grün mit strichlierter Linie.

Aus der Abbildung geht zudem hervor, dass der nutzbare Temperaturbereich des Prozesses durch die Kristallisationskurve der $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ - Lösung begrenzt ist. Infolgedessen kann das verfügbare Temperaturniveau der Wärmequelle im Heizbetrieb nicht vollständig ausgeschöpft werden, da eine Erhöhung der Quellentemperatur zu einer „unzulässig“ hohen Generatortemperatur führen würde. Dies würde das Risiko der Kristallisation erhöhen und somit einen „sicheren Anlagenbetrieb“ nicht mehr gewährleisten. Dies wäre der Fall, wenn die arme Lösung statt mit $t_{\text{PSo,Gen,sat}} = 91 \text{ °C}$ (in blau, durchgängig) mit $t_{\text{PSo,Gen,sat}} = 100 \text{ °C}$ (in grün, strichliert) aus dem Generator austreten würde (siehe „Ablesebeispiel“ Abbildung 5).

3.2 Ionische Flüssigkeiten

Ionische Flüssigkeiten (Ionic liquids, ILs) stellen eine vielversprechende Alternative zu LiBr dar und wurden in der jüngeren Vergangenheit umfangreich untersucht (z.B. im Rahmen von AbSorbEnt). Zu ihren vorteilhaften Eigenschaften zählen ein vernachlässigbarer Dampfdruck, eine hohe thermische und chemische Stabilität, gute Mischbarkeit mit Wasser als Kältemittel sowie ihre Wiederverwertbarkeit (Ji et al., 2023). Chemisch handelt es sich um Salze aus Anionen und Kationen mit einem Schmelzpunkt unter 100 °C . Untersuchungen von Hernández-Bravo et al. (2022) zeigten, dass die für LiBr typischen Korrosions- und Kristallisationsprobleme bei ILs im Allgemeinen nicht auftreten.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „AbSorbEnt“ wurde aus 95 potenziellen Sorptionsmitteln unter anderem die ionische Flüssigkeit *1-Ethyl-3-Methylimidazolium-Methansulfonat* ($[\text{EMIM}][\text{MeSO}_3]$) als besonders geeignet identifiziert. Dieses Sorptionsmittel zeichnet sich durch hohe Temperatur- und Hydrolysestabilität aus. Kurzzeitversuche bei Temperaturen bis zu 215 °C zeigten zwar visuell erkennbare Veränderungen (Verfärbungen), jedoch keine strukturelle Zersetzung der IL. (Wernhart et al., 2025b). Darüber hinaus konnte der erfolgreiche Betrieb einer ursprünglich für LiBr ausgelegten Versuchsanlage mit dieser ionischen Flüssigkeit bei Antriebstemperaturen über 150 °C unter gleichen externen Betriebsbedingungen nachgewiesen werden.

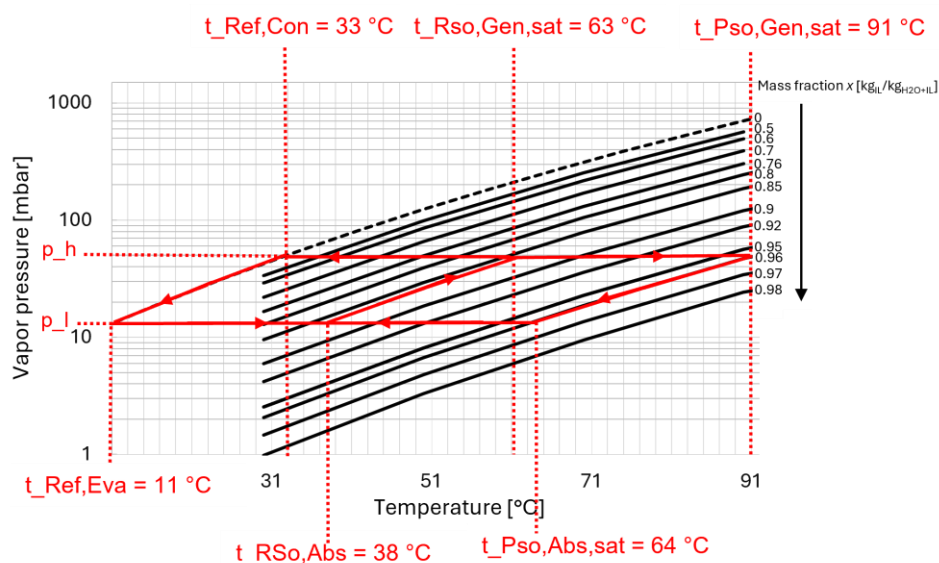


Abbildung 6: Dampfdruck-Temperatur-Diagramm von wässriger $[\text{EMIM}][\text{MeSO}_3]$ - Lösung mit Markierung der relevanten Temperaturen, Drücke und einem beispielhaften Kreisprozess des Arbeitsstoffpaares im Kühlbetrieb, dargestellt in Rot (in Anlehnung an Wernhart et al. (2024a)).

Da das Arbeitsstoffpaar $\text{H}_2\text{O}/[\text{EMIM}][\text{MeSO}_3]$ - wie in Abbildung 6 ersichtlich - keine Kristallisationskurve aufweist, ist der nutzbare Temperaturbereich des Prozesses nicht durch Kristallisationsgrenzen eingeschränkt und dadurch flexibler. Auch hier ist ein beispielhafter Prozess im Kühlbetrieb dargestellt basierend auf den gleichen Annahmen wie bei LiBr (siehe Abbildung 5).

Um die beiden Stoffe thermodynamisch miteinander zu vergleichen kann der spezifische Lösungsumlauf (f) im Fall von Sättigung herangezogen werden:

$$f = \frac{x_{PSO}}{x_{PSO} - x_{RSO}}$$

wobei x_{PSO} der Massenanteil an Lösungsmittel in der armen und x_{RSO} der Massenanteil an Lösungsmittel in der reichen Lösung ist.

Anhand der Beispiele aus Abbildung 5 und Abbildung 6 ergibt sich für LiBr ein spezifischer Lösungsumlauf für den Sättigungsfall von rund $f_{\text{LiBr}} = 5,91$ und für $[\text{EMIM}][\text{MeSO}_3]$ von rund $f_{\text{IL}} = 9,60$. Was bedeutet, dass unter diesen Annahmen für die gleiche Kälteleistung der 1,6 - fache Massenstrom an reicher $\text{H}_2\text{O}/[\text{EMIM}][\text{MeSO}_3]$ - Lösung umgewälzt werden muss, um die gleiche Menge an Kältemittel wie mit $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ zu absorbieren bzw. auszutreiben.

3.3 Stark eutektische Lösungsmittel

Stark eutektische Lösungsmittel (Deep eutectic solvents, DES) sind Mehrkomponentengemische deren Schmelzpunkt im Vergleich zu ihren Reinstoffen eine ausgeprägte Verringerung aufweist (Abbott et al., 2003). Sie besitzen ähnliche Eigenschaften wie ILs, sind aber einfacher in ihrer Herstellung und meist biologisch abbaubar.

Im Rahmen der Auswahlverfahren nach Wernhart et al. (2024b) erwies sich das DES *Betain:Glycerol* als besonders vielversprechend, da es lt. Weinzettl (2026) eine Hydrolysestabilität bis 150 °C aufweist. Im Vergleich zu ionischen Flüssigkeiten ist dieses jedoch deutlich weniger thermisch stabil (Wernhart et al., 2025).

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Absorptionswärmepumpen entfalten ihr Potenzial vor allem als thermische Verbindungsstücke, die Abwärmenutzung, saisonalen Ausgleich und Dekarbonisierung in bestehenden Infrastrukturen verbinden. Wie dieser Beitrag darlegt, eignen sich industrielle Prozesse und Fernwärmenetze, in denen große Mengen ungenutzter Abwärme anfallen, dafür, Wärme zu nutzen, die sich mit konventioneller Wärmerückgewinnung oder rein stromgetriebenen Wärmepumpen nur eingeschränkt oder gar nicht erschließen lässt.

Gleichzeitig wird deutlich, dass das Anwendungspotential von AWP's aufgrund der Lösungsmitelegenschaften noch nicht ausgeschöpft ist. Ihre technische und wirtschaftliche Attraktivität ist stark an die Verfügbarkeit geeigneter Arbeitsstoffe, an stabile Betriebsbedingungen und die sorgfältige Systemintegration gekoppelt. Während das Arbeitsstoffpaar $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ weiterhin den Stand der Technik repräsentiert und in der Einbindung mit industriellen Anlagen auch Anwendung findet, könnten alternative Lösungsmittel, wie die hier vorgestellten und in AbSorbEnt untersuchte IL $[\text{EMIM}][\text{MeSO}_3]$ und DES *Betain:Glycerol* die nutzbaren Temperaturbereiche, die Betriebssicherheit und die Materialverträglichkeit

erhöhen bzw. verbessern, wodurch vor allem die Effizienz gesteigert werden könnte. Die hier grob dargestellten Vergleiche zwischen dem bewährten Lösungsmittel LiBr und den beiden Alternativen zeigen theoretisches Potential, das im Rahmen von AbSorbEnt noch weiter untersucht wird.

Weitere Aspekte für die erfolgreiche Integration von AWP sind die systematische Bewertung realer, individueller Anlagen und der Langzeitstabilität der alternativen Arbeitsmittel. Darüber hinaus ist die Entwicklung von Planungs- und Auslegungskriterien wichtig, die AWP in industrielle Abläufe und Systemnetze integrieren. So wird beispielsweise sichergestellt, dass zu hohe Rauchgastemperaturen oder saisonal unterschiedliche Temperaturbedingungen die Nutzung der AWP in keiner Jahreszeit ausschließen. Vor diesem Hintergrund können AWP durch maximale Nutzung vorhandener thermischer Ressourcen und gleichzeitiger Einsparung elektrischer Energie einen strategischen Beitrag zur Transformation industrieller Wärmesysteme leisten.

Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wird von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft („FFG“) unter der Projektnummer FO999905735 aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des „Energieforschungsprogramms 2022“ durchgeführt.

5 Referenzen

- Abbott, A. P. (2003). Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures. *Chemical communications*. doi:10.1039/B210714G
- AIT. (2025). dryefficiency.eu. Austrian Institute of Technology, Vienna, Austria. Aufgerufen am 27. 11. 2025 von: <https://dryefficiency.eu/integration-demonstration/wienerberger-brick-industry>
- Ayou, D., Wu, W., & Coronas, A. (2025). Absorption-based heat pumps for decarbonization of industrial process heating: performance, current status and new developments. *Thermal Science and Engineering Progress*(62). doi:10.1016/j.tsep.2025.103679.
- Delpech, B., Axcell, B., & Jouhara, H. (2017). A review on waste heat recovery from exhaust in the ceramics industry. *E3S Web of Conferences*. doi:10.1051/e3sconf/20172200034
- Europäische Kommission. (2025). Electrification - Energy - European Commission. Aufgerufen am 27. 11. 2025 von https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/electrification_en
- European Commission. (2007). Reference document on best available techniques in the ceramic manufacturing industry. Publications Office of the European Union. Aufgerufen am 03. 01. 2026 von https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/cer_bref_0807.pdf
- Hernández-Bravo, R., Miranda, A. D., Parra, J. G., Alvarado-Orozco, J. M., Domínguez-Esquível, J. M., & Mujica, V. (2022). Experimental and theoretical study on the effectiveness of ionic liquids as corrosion inhibitors. *Computational and Theoretical Chemistry*, 1210. doi:10.1016/j.comptc.2022.113640

- Herold, K. E., Radermacher, R., & Klein, S. A. (2016). Absorption Chillers and Heat Pumps. CRC Press.
- Ji, L., Shukla, S., Zuo, Z., Lu, X., Ji, X., & Wang, C. (2023). An overview of the progress of new working pairs in absorption heat pumps. *Energy Reports*, 9, 703-729. doi:10.1016/j.egy.2022.11.143
- Rechberger, C. (2009). Wärmerückgewinnung mittels Rauchgaskondensationsanlagen bei biomassebefeuerten Heizkraftwerken. Diplomarbeit, IWT TU Graz.
- Rieberer, R. (2015). Innovative Wärmepumpensysteme. Aufgerufen am 03. 01. 2026 von <https://www.tugraz.at/news/artikel/innovative-waermepumpensysteme>
- Rieberer, R. (2025). Unterlagen zur Lehrveranstaltung "Wärmepumpentechnik". Technische Universität Graz.
- Rötzer . (2025). www.roetzerziegelhaus.de. Rötzer Ziegel-Element-Haus GmbH, Rötz, Deutschland. Aufgerufen am 22. 12. 2025 von: <https://www.roetzerziegelhaus.de/blog/ziegelherstellung>
- SOLID. (n.d.). Thermische Absorptionswärmepumpe - Wärmerückgewinnung durch Rauchgaskondensation. Abgerufen am 27. 11. 2025 von <https://www.solid.at/produkte/absorptionswaermepumpe/>
- Weinzettl, C., Demmelmayr, P., Pachernegg-Mair, L., Wernhart, M., Rieberer, R., Kalb, R., & Kienberger, M. (2026). Determination of physiochemical properties hydrophilic natural deep eutectic solvents as potential sorption media in absorption heat pumps and sorption heat storage units. *Chemical Engineering Journal*, 527, 15. doi:10.1016/j.cej.2025.171586
- Wernhart, M., Rieberer, R., Weinzettl, C., & Demmelmayr, P. (2024a). AbSorbEnt-On the search of alternative sorbents. International Sorption Heat Pump Conference.
- Wernhart, M., Rieberer, R., Weinzettl, C., Demmelmayr, P., Kienberger, M., Damm, M., & Kalb, R. (2024b). Alternative Sorptionsmittel für Absorptionswärmepumpen: Stoffeigenschaften von IL und DES im Vergleich mit LiBr. Proc. Deutsche Kälte-Klima-Tagung 2024 (DKV-Tagung), Dresden, Deutschland.
- Wernhart, M., Rieberer, R., Zlabinger, S., Unterberger, V., & Göllles, M. (2020). Dynamische Simulation von Absorptionskälteanlagen: Dymola-Modell einer H₂O/LiBr-Absorptionskälteanlage. in Proc. Deutsche Kälte-Klima-Tagung: Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V.
- Wernhart, M., Steinwender, E., Rieberer, R., Weinzettl, C., Kienberger, M., Damm, M., Otto, M. & Kemmerzehl, C. (2025). Alternative Sorptionsmittel für Absorptionswärmepumpen. Stoffeigenschaften von IL und DES sowie Betriebsverhalten im "gläsernen Demonstrator". DKV-Tagung 2025, Magdeburg.
- Xu, Z., & Wang, R. (2017). Absorption heat pump for waste heat reuse: current states and future development. *Front. Energy*, 11, 414-436. doi:10.1007/s11708-017-0507-1