

# Die Anwendung der thermodynamischen Transformation im Fernwärmesektor

G. BECKMANN

*Technisches Büro für Maschinenbau und Energietechnik Dr. Beckmann, Wien, Österreich*

F. SCHITTL

*Forschung Burgenland GmbH, Pinkafeld, Österreich*

J. KRAIL

*Fachhochschule Burgenland GmbH, Pinkafeld, Österreich*

**ABSTRACT:** The starting point is district-heating with conventional supply temperatures that already exist or that need to be expanded or newly constructed. The aim is to use an innovative sub-station concept to cover a bundle of energy-services (not only heating but also cooling, reduction of primary side return temperature and even power production).

The proposed concept (“exergy transformer”), patented to a large extent, uses unit operations from the absorption technology and is supposed to reach the targets by shifting operational conditions within the unit operations and by novel flow sheets.

Numerous thermodynamically simulations prove, that the proposed concept is flexible and energy-efficient. In case of the co-generation of heat and chillness an overall degree of utilization above 100 % or a reduction of return temperature below 40 °C seems reachable. Additionally, exergetic evaluations confirm the thermodynamic improvement against conventional solutions. Thus, the proposed concept can enhance the contribution of district heating to reduce emissions, losses, to substitute fossil fuel use and to increase annual utilization.

The exergy transformer could be a useful link when different sectors of processes are intended to be coupled in order to conserve energy.

The instant feasibility study started with the proposed promising concept and proves the concept by means of thermodynamic simulations and plausible considerations. Further experimental developments and industrial research work should increase the technology readiness level of the concept.

## 1. EINLEITUNG

Die Ausgangssituation der gegenständlichen Untersuchung sind Fernwärmesysteme, mit derzeit üblichen Vorlauftemperaturen, und das Ziel, mit neuartigen Übergabestationen primärseitig die Rücklauftemperatur abzusenken bzw. die Temperaturspreizung zu erhöhen. In weiteren Anwendungsfällen soll sekundärseitig nicht nur Kälte, sondern auch Heizwärme und ggf. auch elektrische Energie als Energieserviceleistung bereitgestellt werden. Das vorgeschlagene, innovative Konzept der Übergabestation („Exergietrafo“) auf Basis eines Absorptionskreislaufes soll dieses ermöglichen.

Wärmenetze leisten bereits jetzt einen Beitrag zur Emissionsreduktion in Ballungsgebieten und zur Substitution von fossilen Brennstoffen; in Österreich stammen ca. 45 % der Wärmebereitstellung aus biogenen Brennstoffen (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2018). Der Einsatz von Exergietrafos könnte diesen Beitrag weiter verbessern, und zwar durch die Reduktion der Netzverluste, eine Verbesserung der Netzauslastung und die Verbreiterung der Energieserviceleistungen durch die zusätzliche Bereitstellung elektrischer Energie.

Die Ausführungen beleuchten den Aspekt der Anwendungen des vorgeschlagenen Konzepts der Exergietransformation (Exergietrafo) für Wärmenetze. Die gegenständlichen Untersuchungen wurden im Rahmen des Sondierungsprojekts „TeTra - Thermische Exergietransformation zur Wärme- und Kälteauskopp- lung sowie zur Effizienzsteigerung in Nah- und Fernwärmenetzen“ durchgeführt.

Der Ausgangspunkt der Projektidee ist das erteilte Patent (Beckmann 2012), welches eine Einrichtung zur Erzeugung nicht nur von Kälte, sondern auch von Heizwärme, ggf. auch von Kraft unter der Verwendung eines Absorptionskreislaufes, mit einem Absorber (A), einem Desorber (D), einem Kondensator (K) und einem Verdampfer (V) als Bottom-Cycle zeigt (siehe Abb. 1). Der Desorber wird mit Antriebswärme aus der Fernwärme versorgt, der Verdampfer nimmt Wärme zur Kältebereitstellung auf, während der Kondensator sowie der Absorber Wärmemengen abgeben, welche auch nutzbringend - z.B. für Heizwecke - verwendet werden sollten. Um die Anpassung an wechselnde thermische Gegebenheiten der Wärmequelle und der Verbraucher zu ermöglichen, ist eine Speicherung von Produktströmen unterschiedlicher Kältemittelkonzentrationen vorgesehen, ausgeführt z.B. in einem Schichtspeicher (38), welcher ein Kondensatvolumen (31), ein Speiseflüssigkeitsvolumen (34) sowie das Lösungsvolumen (37), unter der Ausbildung von Trennschichten (39, 40), aufnimmt. Als Top-Cycle dient ein Turbosatz (9) zur Verstromung des Dampfes aus dem Desorber. Bypassleitungen (26 und 17) dienen zur Anpassung, wenn kein Bedarf an der Verstromung bzw. Kältebereitstellung vorliegt.

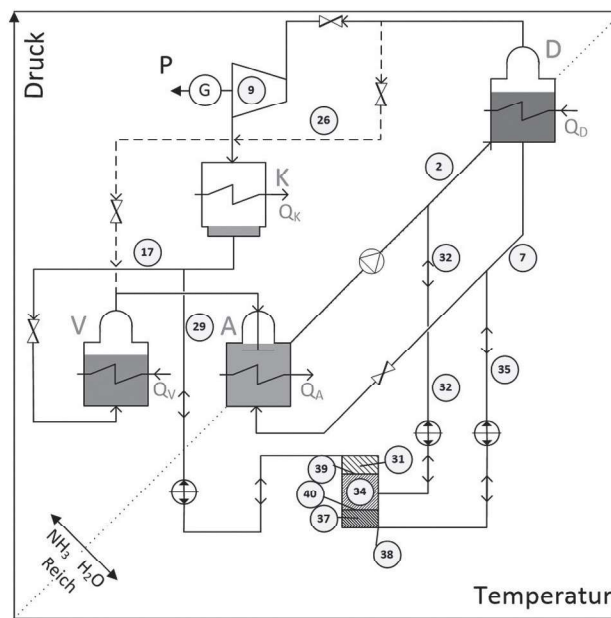


Abb. 1: Verfahrensfliessbild des patentgemäßen Absorptionskreislaufes (Beckmann, 2012); vereinfachend wurde der Lösungswärmetauscher zwischen dem Lösungsrücklauf 7 und der Speiseleitung 2 nicht dargestellt

Die nächste Abb. 2 zeigt den Prozessverlauf im Bottom-Cycle, genauer genommen die entsprechenden Zustände in den Komponenten des Absorbers (A), des Desorbers (hier als Generator G bezeichnet), des Kondensators (K), des Verdampfers (V) sowie des Lösungswärmetauschers (LWT), im  $\log p$  vs.  $-1/T$  Diagramm, für das Arbeitsstoffpaar  $H_2O/LiBr$ . Der linke Rand des Kennfeldes stellt den reinen Wasserdampf, also das reine Kältemittel, mit einer Konzentration von  $LiBr=0\%$ , dar. Durch das Variieren der Drücke und der Konzentrationen kann man die Temperaturen in den Komponenten beeinflussen, sodass abgegebene Wärmequellen in einem nutzbaren Temperaturbereich verschoben werden können. Im Falle des genannten Arbeitsstoffpaares ist die Variationsmöglichkeit durch die Kristallisationsgrenze eingeschränkt.

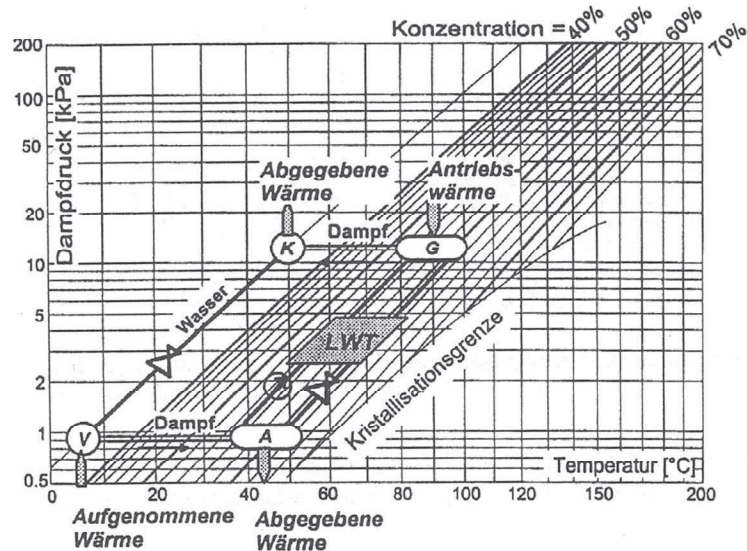


Abb. 2:  $\log p$  vs.  $-1/T$  – Prozessdiagramm des Absorptionskreislaufes mit dem Arbeitsstoffpaar Wasser-Lithiumbromid, mit der LiBr-Konzentration als Parameter (Schweigler et al., 1996)

Das Sondierungsprojekt „Tetra“ sieht vor, die Wärmetauscher der Umformer-Stationen im Netz (teilweise) durch Thermische Energietrafo („Exergietrafo“) zu ersetzen. Das Hauptziel des Projektes war zunächst die Rücklauftemperatur im Fernwärmenetzen zu senken. Dies ist möglich, da der Exergietrafo, anders als eine herkömmliche Übergabestation mit Wärmeübertragung, die Fähigkeit hat, den primärseitigen (Fernwärme-) Rücklauf unterhalb des sekundärseitigen (Heizungs-) Rücklaufes zu kühlen, wie dies die T-Q-Diagramme in der Abb. 3 zeigen. Die nachfolgende Tab. 1 quantifiziert diese Effekte. Die unter der Spalte „Innovativ“ und der Spalte „Gut“ angegebenen Werte scheinen optimistische, aber erreichbare Zielwerte anzugeben. Statt einer Fernwärmerücklauftemperatur (konventionell) von 55 °C kann durch Einsatz von Exergietrafos eine reduzierte Fernwärmerücklauftemperatur von kleiner als 40 °C angepeilt werden; das Fernwärmesystem kann bei bereits bestehenden Fernwärmeleitungen mehr Wärme übertragen oder es können neu zu errichtende Leitungen mit einer kleineren Dimensionierung (down-sizing) ausgeführt werden. In jedem Fall verringert sich zusätzlich der Wärmeverlust in den Netzen.

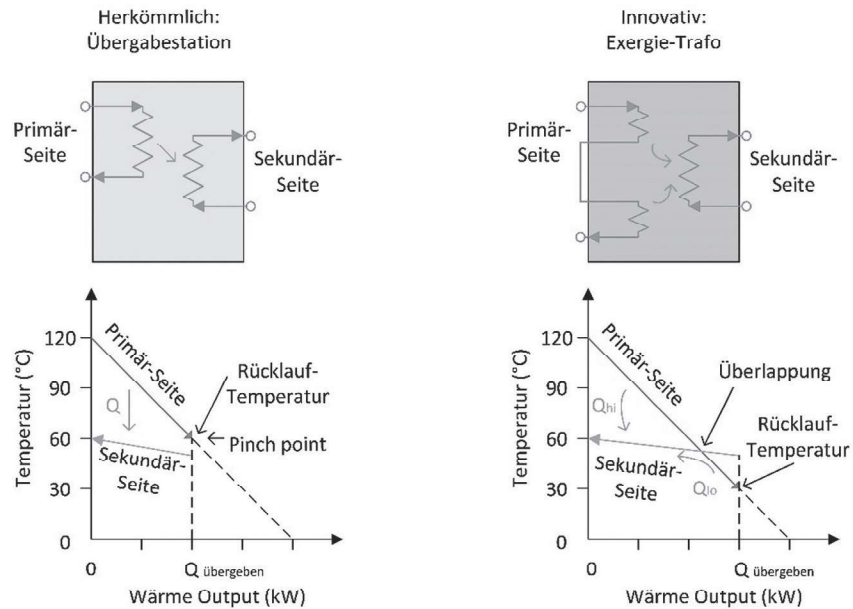


Abb. 3: T-Q-Diagramm Fernwärme-Übergabestation (links) und Exergietrafo zur Rücklauf Temperaturabsenkung (rechts)

Tab. 1: Gegenüberstellung Fernwärmenetz mit konventionellen Übergabestationen und mit Exergietrafos

Übergabestation	Wärmeübertrager, konventionell		Exergietrafo, Innovativ			
	Passabel	Referenz	Gut	Exzellent	Top	
Fernwärmesystem (Primärseite):						
Vorlauftemperatur $t_{VL,pri}$	°C	120 bis 150	120 bis 150			
Rücklauftemperatur $t_{RL,pri}$	°C	70	55	40	20	10
Niedertemperatursystem (Sekundärseite):						
Vorlauftemperatur $t_{VL,sek}$	°C	65		65		
Rücklauftemperatur $t_{RL,sek}$	°C	50		50		
Wärmewirkungsgrad	%	nahezu 100		nahezu 100		
Effekte, wenn der Durchfluss und der Rohrdurchmesser D vorgegeben sind:						
Übertragene Wärmeleistung	%	77	100	123	154	169
Wärmeverluste	%	7 bis 43	5 bis 30*	4 bis 22	2,5 bis 15	2 bis 12
Effekte, wenn die Wärmeleistung und die Rohr-Strömungsgeschwindigkeit vorgegeben sind:						
Down-sizing Faktor $D/D_{Ref}$		1,14	1,00	0,90	0,81	0,77
Wärmeverluste	%	6 bis 38	5 bis 30	4 bis 24	3 bis 19	2,5 bis 16

\* Persönliche Mitteilung (Brask, 2017)

Bezüglich der Wärmebereitstellung vor der Fernwärmleitung sind, abhängig von der Art der Wärmeerzeugung, folgende Effekte festzustellen:

- Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen: mögliche Effizienzerhöhung.
- Biomassegefeuerte KWK-Anlagen: signifikante Effizienzerhöhung, wenn der Rücklauf eine Rauchgaskondensation ermöglicht.
- Die Nutzung von Niedertemperaturquellen aus Abwärme- und nachhaltigen Systemen rückt in den Fokus.
- Die erhöhte Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf erhöht die Attraktivität einer thermischen Energiespeicherung, z.B. als Verdrängungsspeicher ausgeführt (Beckmann & Gilli, 1984).

Die Methodik startet mit dem Valorisieren, Nachrechnen und dem Analysieren einer in Betrieb befindlichen Absorptionskältemaschine (AKM) im Netz der Wien Energie; es ist dies eine einstufige AKM der 5 MW Leistungsklasse, mit der Wärmesenke des Donaukanals. Im Fernkältenetz der Wien Energie sind aktuell in sieben Erzeugungsstationen neben konventionellen Kompressionsanlagen auch insgesamt zehn Absorptionskältemaschinen (LiBr/H<sub>2</sub>O; Leistungsbereich von ca. 1 bis 15 MW) im Einsatz (siehe Abb. 4). Als Wärmequelle dient Wärme aus dem Fernwärmenetz. Im Jahr 2014 wurden mithilfe dieser Anlagen ca. 18.000 MWh/a Kaltwasser in das Wiener Fernkältenetz eingespeist.

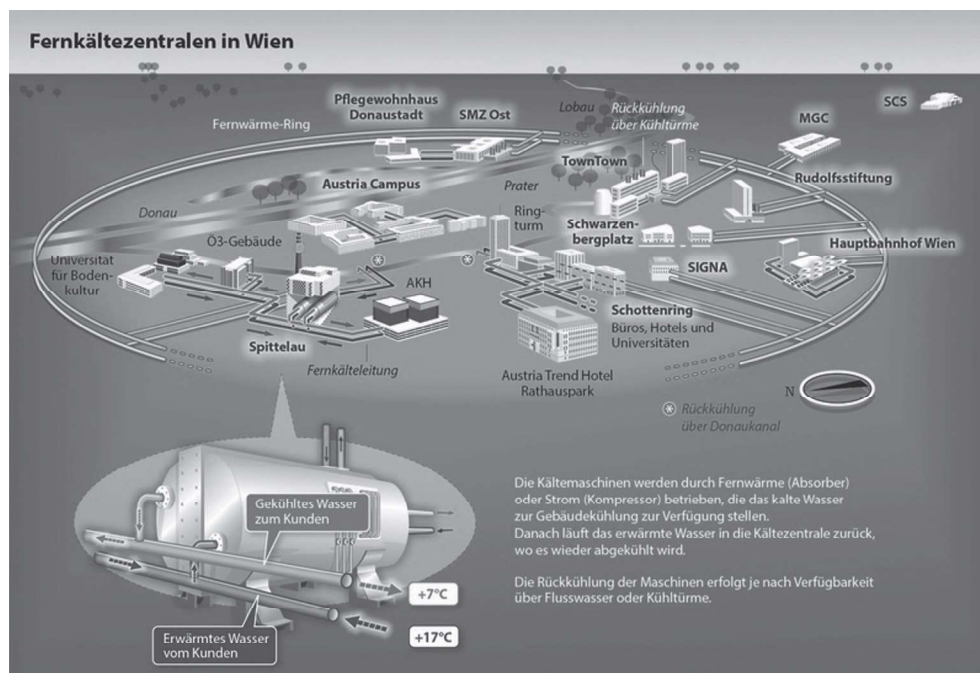


Abb. 4: Schematische Darstellung des Fernkältenetzes der Wien Energie (Wien Energie 2019)

Durch die Variationen der Schaltungen und Verschiebungen der Prozessparameter wurden Kreisläufe kreiert, welche dem erwähnten Einsatzfall gerecht werden; das Variieren und Verschieben erfolgten dabei in Stufen. Die thermodynamisch charakteristischen Werte der Komponenten: Desorber, Kondensator, Verdampfer und Absorber wurden dabei beibehalten. Für diese thermodynamischen Untersuchungen wird die kommerziellen Software IPSEpro eingesetzt (SimTech GmbH 2017).

Sehr bald zeigte sich, dass mit diesen Stufen auch andere, interessante Anwendungsfälle bedient werden konnten. Diese Anwendungsfälle werden im nachfolgenden Kapitel systematisch aufgelistet. Wieder wurde die Simulation eingesetzt, um die Leistungsfähigkeit derartiger Systeme zu quantifizieren.

## 2. ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN DER THERMODYNAMISCHEN TRANSFORMATION

Je nach der anvisierten Anwendungsmöglichkeit kann das Konzept des Exergietrafos in unterschiedlichen Schaltungen realisiert werden. Um diese besser zu veranschaulichen werden die Schaltungen schematisch vereinfacht, indem nur jene Komponenten dargestellt werden, welche peripher Wärme übertragen, wobei auf der Abszisse die Temperaturen aufgetragen werden. Während sich oben die Wärmezuführen zum Trafo befinden, wird unten die Wärmeabfuhr dargestellt. Dazwischen gibt es zwei Ebenen in denen der Wärmeaustausch sowie der Kreislauf (Druck- und Saugseite) dargestellt ist.

- Fall a - Kältebereitstellung ohne Heizwärmebereitstellung

Der Absorptionskälteprozess in der nachfolgenden Abb. 5 veranschaulicht wie dieser zu reinen Kühlzwecken gemäß dem Stand der Technik eingesetzt wird, wobei die Antriebsenergie aus der Fernwärme ausgekoppelt wird und somit eine bessere Auslastung des Netzes im Sommerbetrieb zustande kommt. Die anfallende Abwärme, welche sich aus der Kondensationswärme des Kältemitteldampfes und der freiwerdenden Wärme bei der Absorption zusammensetzt, muss in diesem Fall an die Umgebung abgegeben werden. Diese dem Stand der Technik entsprechende Technologie ist in zweifacher Hinsicht Basis und Benchmark: zu einem, da Komponenten der Absorptionskältemaschine (Desorber, Kondensator, Verdampfer, Absorber, Wärmetauscher) als Bausteine des Exergietrafos dienen, und zum zweiten, da ein Vergleich unter unterschiedlichen Absorptionstechnologien ermöglicht werden.

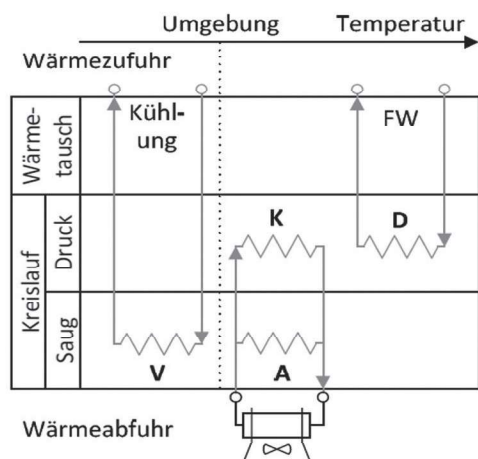


Abb. 5: Fall a - vereinfachte Schaltung des Absorptionskälteprozesses zur Kältebereitstellung gemäß dem Stand der Technik

- Fall b - Wärme- und Kältebereitstellung

Mit der in Abb. 6 dargestellten Verschaltung des TeTra- Prozesses wird neben der Heizenergie auch thermische Energie auf einem niedrigen Temperaturniveau zu Kühlzwecken zur Verfügung gestellt; es handelt sich also im Gegensatz zum Fall a um eine Energiebereitstellung mit unterschiedlichen Qualitäten.

Fall b1 - Co-Generation von Heizwärme und Kälte: Dazu wurden einige Modifikationen, Verschaltungen und Verschiebungen bereits vorgenommen, siehe Abb. 6 links. Der Kondensator (K) wird zu höheren Prozessdrücken hin verschoben, sodass er zum Heizkondensator wird und nutzvoll Wärme als Heizenergie liefert. Die Kältebereitstellung unterhalb der Umgebungstemperatur ist nach wie vor möglich, indem der Absorber (A) nach wie vor seine Wärme an die Umgebung abgibt, wenngleich die Quantität der nutzlosen Abwärme gegenüber dem Fall a drastisch reduziert ist. Des Weiteren wird zusätzlich Heizwärme über den Wärmetauscher (WT) aus dem Fernwärmestrom (FW) ausgekoppelt.

Fall b2 - Erzeugung von Heizwärme aus Fernwärme und aus Low-Exergy-Abwärme: Wird hingegen eine Kühlung eines Wärmestroms (nur knapp) oberhalb der Umgebungstemperatur (Low-Exergy-Wärmestrom) gefordert, so kann der Fall eintreten, dass überhaupt keine Abwärmeabgabe an die Umgebung erforderlich wäre; man kann diesen Fall als Sonderfall von b1 betrachten. Die Frage ist, ab welchem Temperaturniveau des Low-Energy-Wärmestroms (angedacht ist ein Bereich von 30 bis 60 °C) eine derartige Betriebsweise möglich ist. Dann kann, z.B. mittels einer Verschaltung durch das serielle Durchströmen der beiden Komponenten Absorber (A) und Kondensator (K), Nutzwärme lukriert werden. Der Low-Exergy-Wärmestrom kann zur Heizwärme hochgepumpt werden. Eine Wärmeabfuhr an die Umgebung entfällt. Die Steigerung der Effizienz ist drastisch.

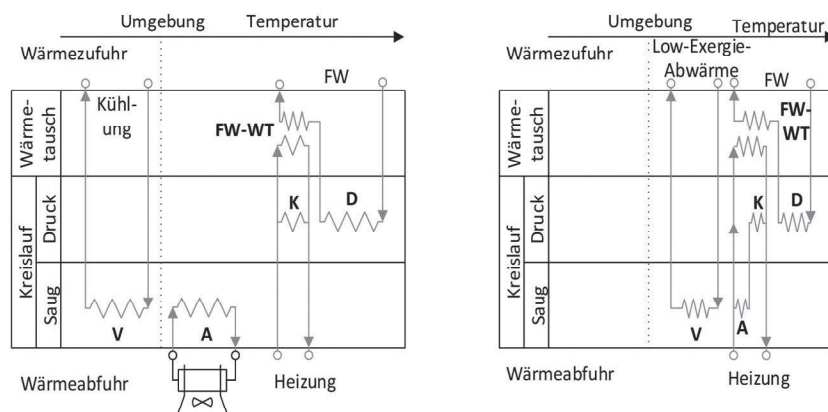


Abb. 6: Vereinfachte Schaltung des TeTra-Prozesses zur gekoppelten Wärme- und Kältebereitstellung, Fall b1 - Co-Generation von Wärme und Kälte (links), Fall b2 - Wärmepumpen einer Low-Exergy-Abwärmequelle, für Heizzwecke (rechts)

- Fall c - Wärmebereitstellung mit Rücklauf Temperaturabsenkung

Ausgehend vom Fall b2 besteht eine Anwendungsmöglichkeit darin, den Prozess ausschließlich zur Deckung des Wärmebedarfs zu nutzen. Hierfür wird die in der unten angeführten Abb. 7 dargestellte Verschaltung der einzelnen Komponenten herangezogen. Wie aus dem Schaltbild ersichtlich ist, wird hier der Verdampfer (V) zur weiteren Abkühlung des Fernwärmestromes genutzt, wobei hier der Verdampfungsdruck deutlich höher liegt als bei der konventionellen Nutzung. Der Prozess arbeitet abwärmelos und enthält auch keine Einrichtung zur Rückkühlung.

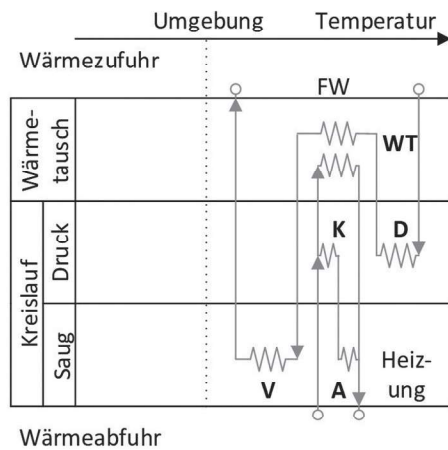


Abb. 7: Fall c - Vereinfachte Schaltung des TeTra-Prozesses zur Wärmebereitstellung mit Rücklauf-temperaturabsenkung

- Fall d - Elektrische Energiebereitstellung

Das Grundprinzip des TeTra-Prozesses sieht bereits eine zusätzliche Erzeugung von elektrischer Energie („Kraft“) vor, indem kältemittelseitig ein etwaiger Überschuss von Temperatur und Druck im Desorber in einer Turbine expandiert und verstromt und dann erst zum Kondensator gelangt (siehe Abb. 1). Diese optionale Prozessführung kann auf die Bereitstellungs- Fälle a (nur Kälte), b (Kälte und Wärme als Co-Generation bzw. Wärmepumpenbetrieb) oder c (Heizwärme mit Fernwärme-Rücklauf-Temperatur-Absenkung) aufsetzen. Die nachfolgende, thermodynamische Grobabschätzung bezieht sich auf den Basis-Fall a; mit dieser Kombination wird auch jene Variante untersucht, bei welcher die zusätzliche Stromerzeugung ein Maximum darstellt, da der Kondensatordruck tief liegt. Die Stromerzeugung wird durch einen steigenden Druck am Desorber ermöglicht und einer steigenden Rücklauftemperatur erkauft. Für die Simulation mussten hinsichtlich der neu hinzugekommenen Komponente des Turbo-Generators komponenten-spezifische Annahmen getroffen werden (Wirkungsgradkette des Turbo-Generators  $0,75 \cdot 0,98 \cdot 0,95 \cdot 0,98 = 0,684$ , Druckverhältnis vor/nach Turbine: 3,3). Vorwegnehmend kann gesagt werden, dass bei einer zusätzlichen Stromerzeugung von ca.  $250 \text{ kW}_{el}$ , basierend auf den Komponenten einer AKM mit  $5000 \text{ kW}$  Kühllast, die Grenze zu liegen scheint.

Neben den thermodynamischen Aspekten, welche durch diese Simulationen grob quantifizierbar sind, verbleibt natürlich Frage, ob wie eine derartige Expansionsmaschine am Markt verfügbar ist.

Nach den genannten Anwendungen für Fernwärmesysteme sollen noch ohne Anspruch auf Vollständigkeit, die potentiellen Anwendungen in den Sektoren der Verfahrenstechnik erwähnt werden:

- Kraftwerkstechnik und KWK-Anlagen: Rauchgaskondensation in Biomasseheizkraftwerken, in BHKWs Fall b2: Die Rauchgasabkühlung liefert Wärme für den Desorber, Kondensator und Absorber geben Heizwärme ab, Verdampfer kühlt das Rauchgas weiter, was zu einer (partiellen) Rauchgaskondensation, mit Gesamtwirkungsgraden über 100 %, führen kann. Diese Effekte sind bei feuchten Rauchgasen aus der Verfeuerung feuchter Klärschlämme und Biomassen, Biogasen und Erdgasen besonders ausgeprägt. Derartige Absorptionswärmepumpen werden bereits in Biomasseheizkraftwerken, z. B. in Klagenfurt und Hallein, angewendet (Jaunegg, 2019). Ebenfalls interessant könnte die Co-Generation von Heizwärme und Kälte (Fall b1) sein.
- Lebensmittelindustrie: wenn ein Heizen und Kühlen erforderlich sind.

- Trocknungstechnik: Wärmequellen haben oft ein höheres Temperaturniveau als der Trocknungsprozess verträgt (z. B. Getreidetrocknung, Hackschnitzeltrocknung). Abkühlung und Brüdenwärmerückgewinnung aus der Trocknerabluft; Kühlung und Entwaschung des getrockneten Gutes). Eine Anwendung gemäß dem Fall b2. In der Trocknungstechnik - und auch allgemein - steht die Anwendung der Absorptionswärmepumpe in Konkurrenz zur Kompressions-Wärmepumpe.
- Abwärmenutzung, zum Heizen und Kühlen, auch ohne Stromerzeugung.

Die Auflistung zeigt die Vielfalt der Anwendung der innovativen Absorptionstechnologie, vor allem der Betriebsfall zur Co-Generation und jener der Wärmepumpe (Fall b1 und Fall b2), wobei der Fall c eher eine Besonderheit innerhalb des Sektors der Fernwärmesysteme ist und der Fall d in fernerer Zukunft liegt.

### 3. PERFORMANCE-ZIFFERN, SIMULATIONEN UND BEWERTUNGEN DER ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN

Angesichts der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten ist eine Vielfalt von Performance-Ziffern in Gebrauch, die in Folge definiert werden. In diesen Definitionen wird als  $\dot{Q}_{FW}$  (kW) die zugeführte Fernwärmeleistung,  $\dot{Q}_{Kälte}$  (kW) die produzierte Kälteleistung und  $\dot{Q}_{Wärme}$  (kW) die produzierte Wärmeleistung und  $P_{el}$  (kW) die produzierte elektrische Leistung bezeichnet.

- Wirkungsgrad nur Kälteproduktion  $\eta_{Kälte}$ :

$$\eta_{Kälte} = COP = \frac{\dot{Q}_{Kälte}}{\dot{Q}_{FW}} \quad (1)$$

- Wirkungsgrad bei Kälte-  $\eta_{Kälte}$  und Wärmeproduktion  $\eta_{Wärme}$ :

$$\eta_{Kälte} = \frac{\dot{Q}_{Kälte}}{\dot{Q}_{FW}} \quad (2)$$

$$\eta_{Wärme} = \frac{\dot{Q}_{Wärme}}{\dot{Q}_{FW}} \quad (3)$$

Bei Prozessen mit gekoppelter Wärme- und Kältebereitstellung ist der Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{Ges}$  i.d.R. > 100 %.

- Wirkungsgrad der zusätzlichen Produktion elektrischer Energie  $\eta_{el}$ :

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{FW}} \quad (4)$$

- Der Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{Ges}$  ergibt sich aus der Summe der Einzelwirkungsgrade  $\eta_i$ :

$$\eta_{Ges} = \sum_i \eta_i \quad (5)$$

- Wirkungsgrade bei der Rücklauftemperaturabsenkung: Dieser Fall wird durch keine der o. g. Performance-Ziffern adäquat beschrieben. Die Vielfalt der Performance-Ziffern lässt die Frage nach einer universalen, für alle Anwendungsfälle gültigen Kennzahl entstehen.
- Exergetischer Wirkungsgrad  $\eta_{Ex}$ :  
Der Exergetische Wirkungsgrad  $\eta_{Ex}$  sollte eine derartige, für alle Anwendungsfälle adäquate Kennzahl sein. In nachfolgenden Gleichungen sind  $\dot{E}_{zu}$  (kW) die dem System zugeführten Exergieströme und  $\dot{E}_{ab}$  (kW) die aus dem System abgeführten Exergieströme:

$$\eta_{Ex} = \frac{\sum \dot{E}_{ab}}{\sum \dot{E}_{zu}} \quad (6)$$

Der exergetische Wirkungsgrad  $\eta_{Ex}$  ist in allen Fällen  $< 100 \%$ .

Die Berechnung der Exergieströme  $\dot{E}$  (kW) erfolgt nach den folgenden Gleichungen, wobei  $T_{amb}$  (K) die Umgebungstemperatur,  $T_m$  (K) die Mitteltemperatur des Massestroms während der Wärmeübertragung mit (kg/s) den Massenstrom und  $h$  (kJ/kg) die Enthalpie bezeichnen:

- Exergiezuffluss  $\dot{E}$  an der Systemgrenze:

$$\dot{E} = \Delta \dot{Q} \frac{T_{amb}}{T_m} \quad (7)$$

- Wärmezuffluss  $\dot{Q}$  an der Systemgrenze:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_{Ein} - h_{Aus}) \quad (8)$$

Bei einem linearen Temperaturverlauf ( $c_p = \text{konst.}$ ) während der Wärmeübertragung ist:

$$T_m = T_{log0} = \frac{T_{Ein} - T_{Aus}}{\ln \left( \frac{T_{Ein}}{T_{Aus}} \right)} \quad (9)$$

Die Temperatur  $T_{log0}$  kann als mittlerer logarithmischer Temperaturabstand zu 0 K interpretiert werden (Beckmann & Gilli, 1984).

Eine weitere Hürde für die Ermittlung des exergetischen Wirkungsgrades ist die Frage, welche Umgebungstemperatur man zu Grunde legt. Sinnvollerweise wählt man als Umgebungstemperatur  $T_{amb}$  die mittlere logarithmische Temperatur der zur Verfügung stehenden Wärmesenke, also im vorliegenden Falle die Kühlwassertemperatur; diese ist bei einem VL/RL = 17,9/28,7 °C gleich  $T_{amb} = 296,4$  K bzw.  $t_{amb} = 23,3$  °C.

Trotz der aufwändigen Prozedur kann man von dem Wert des exergetischen Wirkungsgrades nicht (direkt) auf Leistungsziffern schließen. Was hingegen gelingt, ist der Vergleich zwischen den Anwendungsfällen und ein Hinweis auf die Güte der Prozesse.

In der nachfolgenden Tab. 2 sind die Performance-Ziffern, die relevanten Wirkungsgrade für Kälte, Wärme und Strom, die sich ergebende Gesamtwirkungsgrade und die exergetischen Wirkungsgrade aller betrachteten Fälle a bis d wiedergegeben; die konventionelle Übergabestation auf Basis eines Wärmeübertragers („GUFO“ - Gebietsumformer) markiert den Ausgangspunkt. Betrachtet werden nur die Performance-Ziffern des Aggregates, also nicht die sich ergebenden Effekte im Netz und bei der Wärmeerzeugung.

In den Fällen der Co-Generation von Wärme und Kälte und der Wärmepumpe für Abwärme (Fälle b1 und b2) ist der Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{ges} > 100 \%$ , da sowohl die Kühllast als auch die Abwärme eine Wärmezufuhr zum Exergietrafo bedeutet.

Die positiven Effekte des Falles c, der Rücklaufemperatur-Absenkung, wurden bereits abgehandelt und in der eingangs gezeigten Tab. 1 quantifiziert. Gemäß den Simulationen beträgt die erreichbare Rücklaufemperatur 23,9 °C, womit der angepeilte Zielwert von  $< 40$  °C unterboten wurde; der Rücklauf enthält demnach nur mehr eine verschwindend geringe Exergie. Vom Standpunkt des Gesamtwirkungsgrades erzeugt der Apparat Heizwärme im gleichen Maße wie Fernwärme eingesetzt wird (also  $\eta_{ges}$  ist nahezu 100 %).

Tab. 2: Performance-Ziffern für die einzelnen Fälle (Ergebnisse aus den Simulationsrechnungen)

Größe	Einheit	GUFO	a	b1	b2	c	d
Fernwärmeverlauftemperatur	°C	148,7	148,7	148,7	148,7	148,7	148,7
Fernwärmerücklauftemperatur	°C	55,0	61,2	55,0	55,0	23,9	87,2
sek. Heizungsvorlauftemperatur	°C	65,0	-	65,0	65,0	65,0	-
sek. Heizungsrücklauftemperatur	°C	50,0	-	50,0	50,0	50,0	-
Kühlwassereintrittstemperatur	°C	-	17,9	17,9	-	-	17,9
Kühlwasseraustrittstemperatur	°C	-	28,7	28,7	-	-	28,7
Kaltwassereintrittstemperatur	°C	-	9,9	9,9	40,0	-	9,9
Kaltwasseraustrittstemperatur	°C	-	3,1	3,1	23,7	-	3,1
Zugeführte Fernwärmeleistung	kW	6.959	6.381	6.959	6.959	9.243	6.619
Produzierte Kälteleistung	kW	0	5.000	2.876	0	0	4.858
Produzierte Wärmeleistung	kW	6.959	0	6.099	9.223	9.243	0
Produzierte elektrische Leistung	kW	0	0	0	0	0	248
Wirkungsgrad Kälte	%	0	78,4	41,3	0	0	73,4
Wirkungsgrad Wärme	%	100	0	87,6	132,5	100	0
Elektrischer Wirkungsgrad	%	0	0	0	0	0	3,7
Gesamtwirkungsgrad	%	100,0	78,4	129,0	132,5	100,0	77,1
exergetische Wirkungsgrad	%	50,3	21,9	56,0	63,8	61,9	34,3

GUFO: Gebietsumformerstation (Benchmark)

Fall a: Kältebereitstellung ohne Heizwärmebereitstellung

Fall b1: Co-Generation von Heizwärme und Kälte

Fall b2: Erzeugung von Heizwärme aus Fernwärme und aus Low-Exergy-Abwärme. Eine Abwärmequelle von z.B. 45 °C auf 30 °C heizt Wasserkreislauf von z.B. 23,7 °C auf 40 °C auf und diese Abwärme wird eingebunden und hochgepumpt.

Fall c: Wärmebereitstellung mit Rücklauftemperaturabsenkung

Fall d: Elektrische Energiebereitstellung

In der nachfolgenden Abb. 8 sind die Ergebnisse in der Form eines Balkendiagramms dargestellt.

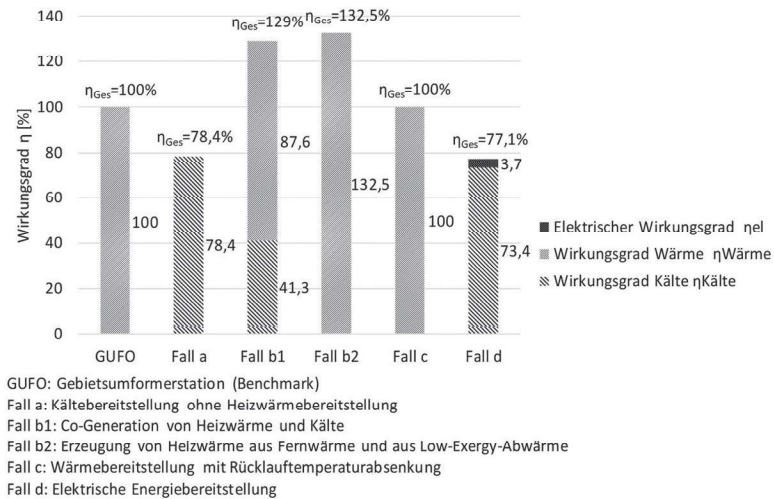


Abb. 8: Einzelwirkungsgrade- und Gesamtwirkungsgrade  $\eta_{Ges}$  für die betrachteten Fälle

Die nächste Abb. 9 zeigt die Exergetischen Wirkungsgrade für den GUFO und für die Fälle a bis d. Diese Werte sind ein Maß für die thermodynamische Güte der jeweiligen Prozesse. Ausgehend vom GUFO mit einem exergetischen Wirkungsgrad von ca. 50 % steigert sich dieser für die Fälle b1 (Co-Generation), b2 (Wärmepumpenfunktion) und c (Rücklauf Temperaturabsenkung) auf Werte um ca. 60 %, und zwar durch die Thermodynamische Transformation.

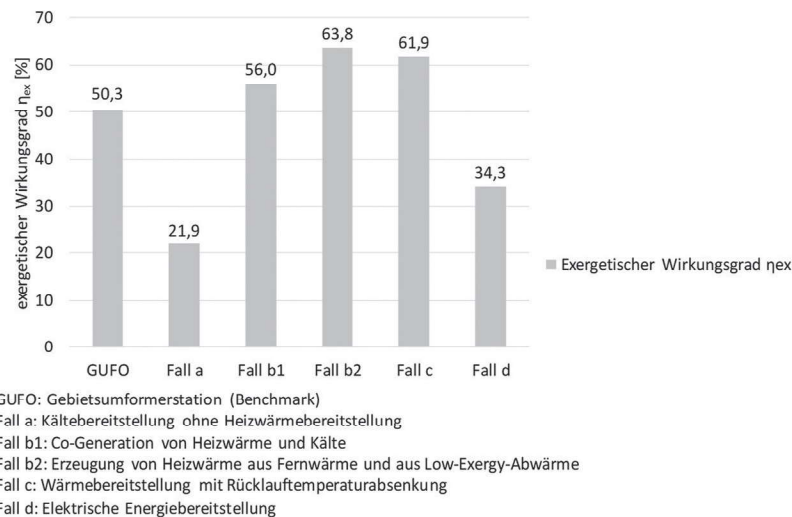


Abb. 9: Exergetische Wirkungsgrade für die betrachteten Fälle

Neben den thermodynamischen Aspekten und der Energieeffizienz gibt es noch die ökonomische und ökologische Bewertung.

Die ökonomische Grobabschätzung lässt schließen, dass sich mit dem Fall c der Rücklauf-temperaturabsenkung allein aus dem Posten der Verminderung der Netzverluste schwerlich eine Rentabilität darstellen lässt, es sei denn es liegen extrem begünstigende, andere Randbedingungen vor. Die Co-Generation (Fall b1 und b2) könnte hingegen mit der reinen Kälteerzeugung (Fall a) mithalten. Der Fall d (zusätzliche Stromerzeugung) verschließt sich einer ökonomischen Abschätzung, da die Komponente der Expansionsmaschine nicht marktverfügbar ist.

Die ökologische Bewertung macht sich das Substitutionsprinzip zu Nutze, wobei, die Effizienzsteigerung der neuen Technologien gegenüber den herkömmlichen Erzeugungstechnologien der Schlüsselfaktor ist.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Die Ausgangssituation der gegenständlichen Sondierung sind Fernwärmesysteme, mit derzeit üblichen Vorlauf-temperaturen, und die Zielforderung, mit neuartigen Übergabestationen ein Bündel von Energie-Anwendungen (nicht nur Heizen, sondern auch Kühlen, Rücklaufabkühlen, ggf. auch Stromerzeugung) abzudecken.

Das vorgeschlagene, innovative Konzept der Übergabestation („Exergietrafo“) baut auf Komponenten eines Absorptionskreislaufes auf und soll durch Verschiebungen der Zustände und Verschaltungen der Komponenten den Zielforderungen gerecht werden.

Die im Rahmen der Sondierung durchgeführten systematischen thermodynamischen Simulationen zeigen, dass das vorgeschlagene Konzept dazu geeignet, vielseitig, und energieeffizient ist: beim Heizen und Kühlen erscheinen Wirkungsgrade spürbar über 100 % und bei der Rücklaufabsenkung Temperaturen spürbar unter 40 °C erreichbar. Exergetische Bewertungen zeigen zudem die thermodynamische Verbesserung gegenüber konventionellen Lösungen. Damit könnte das Konzept den Beitrag der Fernwärme zur Emissionsminderung, Verlustreduzierung und zur Effizienzsteigerung erhöhen.

Über die Anwendungen im Sektor der Fernwärme hinausgehend wurden Anwendungen aus anderen Sektoren identifiziert und zumindest interessant eingestuft.

Der Exergietrafo könnte als Bindeglied bei einer energiemäßigen Sektorenkopplung fungieren.

Die gegenständliche Sondierung startete beim Grundprinzip und bestätigte das Konzept auf Basis thermodynamischer Simulationen; im nächsten Schritt sollen Experimentelle Entwicklungen bzw. Industrielle Forschungen den Reifegrad weiter vorantreiben.

#### 5. DANKSAGUNG

Das Sondierungsprojekt „TeTra - Thermische Energietransformation zur Wärme- und Kälteauskopplung sowie Effizienzsteigerung in Nah- und Fernwärmenetzen“ wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „Energieforschung“ durchgeführt. Das Projektkonsortium besteht aus den Unternehmen Forschung Burgenland GmbH (Konsortialführer), Technisches Büro für Maschinenbau und Energietechnik Dr. Beckmann sowie Wien Energie GmbH.

#### LITERATUR

- Beckmann, G. (2012). Verfahren und Einrichtung zur Erzeugung von Kälte und/oder Nutzwärme sowie mechanischer bzw. elektrischer Energie mittels eines Absorptionskreislaufes (Patent Nr.: AT511823B1).
- Beckmann, G. und Gilli, P. V. (1984). Thermal Energy Storage. New York, Wien: Springer Verlag.
- Brask, P. (2017). Durchschnittliche Wärmeverluste in Wärmenetzen (Persönliche Mitteilung).
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (Hrsg.) (2018). Energie in Österreich 2018 – Zahlen, Daten, Fakten. Wien.
- Jaunegg, E. (2019). Vergleich verschiedener Wärmepumpentechnologien für den Einsatz in Rauchgaskondensationsanlagen von Biomasseheizwerken. Pinkafeld.

- Schweigler, C., Hellmann, H. M. und Demmel, S. (1996). Neuer Absorptions-Kaltwassersatz für den Einsatz in Fernwärmenetzen. *Ki Luft- und Kältetechnik*, 32. Jahrga: 305–309.
- SimTech GmbH (2017). IPSEpro - Software system for calculating heat balances and simulating processes. <http://www.simtechnology.com/CMS/index.php/ipsepro>.
- Wien Energie (2019). Fernkälte - Cool bleiben trotz Klimaerwärmung. (online). <https://www.wienenergie.at/eportal3/ep/channelView.do/channelId/-48288>. Abgerufen am 1. Oktober 2019.

*Kontaktdaten Autor(en):*

*Technisches Büro für Maschinenbau und Energietechnik  
DI Dr. Georg Beckmann  
Anton-Baumgartner-Straße 44/B7/016  
1230 Wien  
Email: [georg.beckmann@chello.at](mailto:georg.beckmann@chello.at)*

*Fachhochschule Burgenland GmbH  
DI DI(FH) Jürgen Krail  
Steinamangerstraße 21  
7423 Pinkafeld  
Email: [juergen.krail@fh-burgenland.at](mailto:juergen.krail@fh-burgenland.at)*